

Münchner Universitäts-Schriften

Fachbereich Physik

Universität München - Meteorologisches Institut

Wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 49

Die Energiebilanz des Menschen

von

P. Höppe

Aus den Arbeiten des Lehrstuhls für Bioklimatologie und

Angewandte Meteorologie

München 40, Amalienstraße 52 /III

im März 1984



Die Energiebilanz des Menschen

Dissertation der Fakultät

für Physik

der Ludwig - Maximilians - Universität

in München

vorgelegt von Peter Höppe

aus München

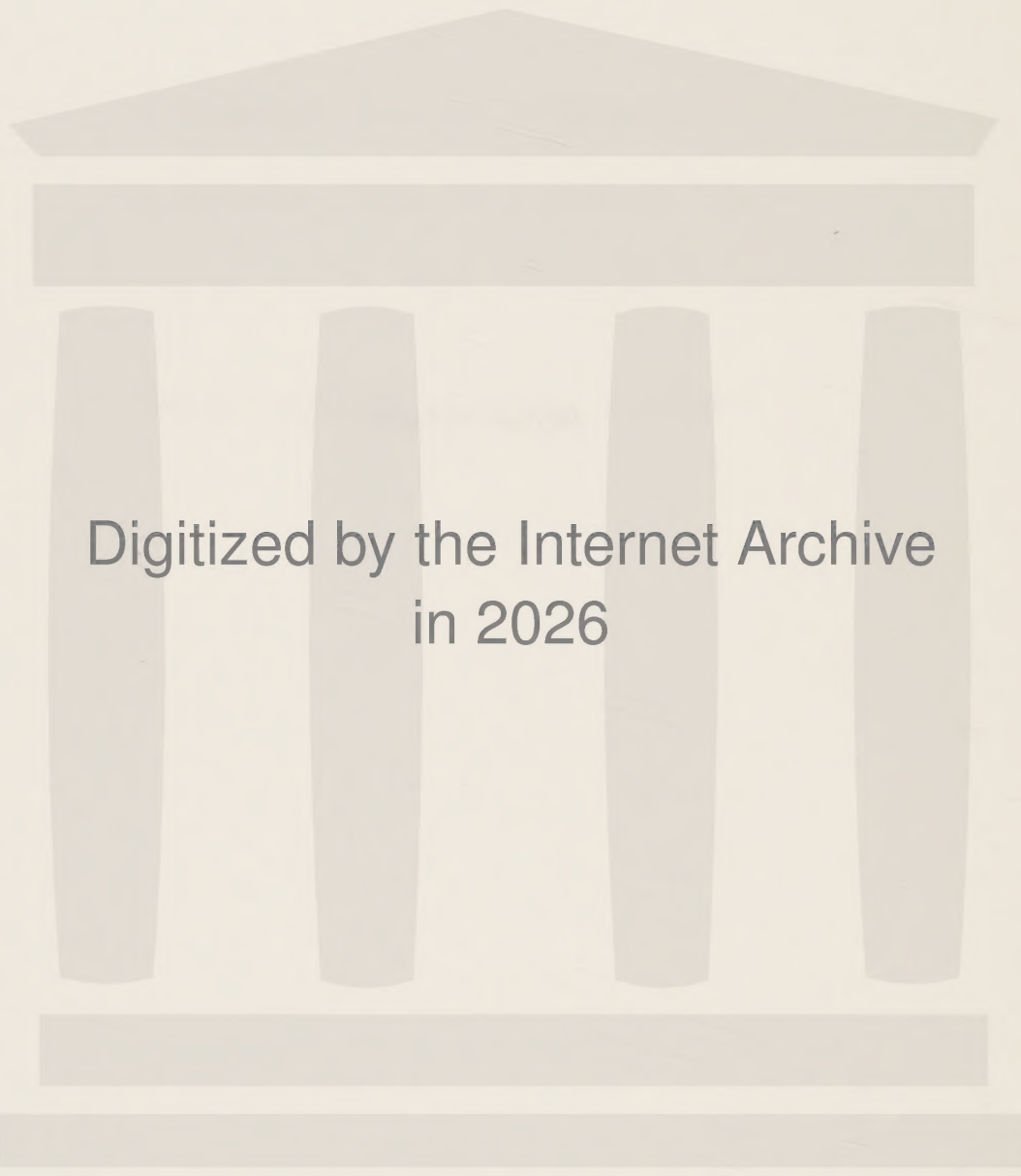
München, den 14.12.1983

1. Gutachter: Prof. Dr. A. Baumgartner

2. Gutachter: Prof. Dr. H. Quenzel

Tag der mündlichen Prüfung: 1.3.1984

Meinen Eltern



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555209_0020

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von Februar 1980 bis April 1983 am Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Ludwig - Maximilians - Universität in München unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. A. Baumgartner.

Ich danke meinem verehrten akademischen Lehrer Prof. Dr. A. Baumgartner für das hochinteressante Thema und die Möglichkeit, an seinem Lehrstuhl diese Arbeit durchführen zu können.

Zu Dank verpflichtet bin ich auch den Kollegen am Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie für deren stets offenes Ohr und deren Diskussionsbereitschaft, im besonderen Herrn Dr. Helmut Mayer.

Für die graphische Gestaltung der Abbildungen danke ich Herrn W. Hirner und der Forschungsgruppe "STADTKLIMA BAYERN" für die Arbeitsmöglichkeit an deren Plotter.

Besonderen Dank schulde ich Herrn Dr. Wilhelm Donle und der Gesellschaft zur Bekämpfung der spinalen Kinderlähmung und anderer Zivilisationsseuchen für die materielle Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	II
Zusammenfassung	IV
Verzeichnis der verwendeten Symbole	VII
1 Einleitung	1
1.1 Geschichtlicher Überblick	1
1.2 Die Energiebilanzgleichung des Menschen	4
2 Die Energieflüsse des Menschen	7
2.1 Die metabolische Rate	7
2.1.1 Der Grundumsatz	9
2.1.2 Der Aktivitätumsatz	13
2.1.3 Die Arbeitsleistung nach außen	19
2.1.4 Die innere Wärme	20
2.2 Die fühlbare Wärme	21
2.2.1 Die Konvektion	21
2.2.2 Die Konduktion	32
2.2.3 Die Berechnung des Flusses fühlbarer Wärme	35
2.3 Die Wasserdampfdiffusion	36
2.4 Die Schweißverdunstung	41
2.4.1 Die Physiologie des Schwitzens	41
2.4.2 Die physiologische Schweißrate	44
2.4.3 Die Energetik der potentielle Schweißverdunstung	50
2.4.4 Der Energieverlust des Körpers durch Transpiration	52
2.5 Der Strahlungssaldo	54
2.6 Der Energiefluß in die Atemluft	65
2.7 Der Wärmeaustausch des Körpers mit der Nahrung	71
2.8 Die Wärmespeicherung im Körper	73
3 Modell zur Berechnung der Körpertemperaturen	77
3.1 Wärmefluß vom Körperkern zur Hautoberfläche	77
3.2 Wärmefluß durch die Bekleidung	80
3.3 Das Berechnungsverfahren	82
4 Die Thermophysiologie der Kleidung	85
5 Die Wasserbilanz des Menschen	91
5.1 Die Wasserbilanzgleichung	91
5.2 Die Terme der Wasserbilanzgleichung	92
5.2.1 Der Wasserverlust durch Transpiration	92
5.2.2 Der Wasserverlust durch Wasserdampfdiffusion	92
5.2.3 Der Wasserverlust durch Respiration	93

	Seite
5.3 Quantitative Darstellung der Terme der Wasserbilanz	93
6 Energiebilanzgleichung und Behaglichkeit	101
7 Der Mensch in verschiedenartigen Klimasituationen	105
7.1 Der Mensch im Raumklima	105
7.2 Der Mensch im Ruhestadium	120
7.3 Der Mensch in extremen Klimazonen der Erde	129
7.3.1 Der Mensch im Polarklima	129
7.3.2 Der Mensch im subtropischen Klima	133
7.3.3 Der Mensch im feuchttropischen Klima	139
7.3.4 Der Mensch im Höhenklima	144
8 Schlußbetrachtung	151
Verzeichnis der Abbildungen	153
Verzeichnis der Tabellen	158
Literatur	160
Anhang	

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zwei größere Blöcke. Im ersten dieser Blöcke (Kap. 1-3) werden die in der Energiebilanzgleichung des Menschen zusammengefaßten Energieflüsse diskutiert und Ansätze zu deren Quantifizierung abgeleitet. Ein Rechenverfahren, das unter Berücksichtigung der Wärmeflüsse vom Körperkern zur Hautoberfläche und von dort zur Bekleidungsoberfläche die Lösung der Energiebilanzgleichung ermöglicht, wird vorgestellt. Im zweiten Teil der Arbeit (Kap. 5-7) werden an Beispielen, die neben häufig auftretenden Klimabedingungen auch extreme Klimate der Erde beinhalten, Anwendungen des Rechenmodells, wie die Berechnung des Wasserverlustes, der mittleren Hauttemperatur oder des Hautbenetzungsgrades verschiedener Personen dargestellt. Ebenso werden Bewertungsmöglichkeiten der berechneten Parameter bezüglich der thermischen Behaglichkeit diskutiert. Hierzu werden Behaglichkeitsgrenzwerte der mittleren Hauttemperatur, der Schweißrate und des Hautbenetzungsgrades angegeben.

Nach einem kurzen Überblick über die Geschichte der Biometeorologie bis hin zu neueren Rechenmodellen wird in Kapitel 1 die Energiebilanzgleichung des Menschen vorgestellt, deren Terme dann in Kapitel 2 im einzelnen analysiert werden. So wird in Abschnitt 2.1 die metabolische Rate, die sich aus der Summe des Ruheumsatzes und des Aktivitätsumsatzes ergibt, als Funktion der Körpermasse, der Körpergröße, des Alters und des Geschlechtes eines Menschen angesetzt.

Eine neu erarbeitete Tabelle der Aktivitätsumsätze und der metabolischen Raten zweier ausgewählter Personen für verschiedenartigste Tätigkeiten wird in Abschnitt 2.1.2 vorgestellt.

Der Abschnitt 2.2 ist dem Fluß fühlbarer Wärme gewidmet, dessen konvektive und konduktive Anteile jeweils getrennt für bekleidete und unbekleidete Körperanteile angesetzt werden. Eine Zusammenstellung experimentell gefundener Ansätze verschiedener Autoren für die konvektive Wärmeübergangszahl am menschlichen Körper wird in tabellarischer Form und in Abbildungen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit angegeben.

Bei der Diskussion des Energieverlustes des Menschen durch Wasserdampfdiffusion (2.3) wird dessen Abhängigkeit von der Beschaffenheit der äußersten Hautschicht betont und im Ansatz der Hautbenetzungsgrad berücksichtigt.



Der Abschnitt 2.4 ist der Transpiration gewidmet. Nach einer Einführung in die physiologischen Gegebenheiten der Schweißsekretion (2.4.1) werden Modelle zur Quantifizierung der Schweißrate verglichen (2.4.2). Dabei wird der Steuerung der Schweißsekretion durch eine gewichtete Mitteltemperatur aus Haut- und Kerntemperatur der Vorzug gegenüber anderen Steuergrößen gegeben.

Die experimentell gefundenen geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Schweißsekretion werden in den Ansätzen berücksichtigt. Da die potentielle Verdunstung eine limitierende Größe für den Energieverlust durch Transpiration darstellt, wird ein Ansatz für sie, basierend auf der energetischen Verdunstungsformel, hergeleitet.

Die Berechnung des Strahlungssaldos eines Menschen (2.5) wird jeweils getrennt für bekleidete und unbekleidete Körperanteile angesetzt. Die experimentelle Quantifizierung der Raumwinkelanteile verschiedener einen Menschen umgebenden Oberflächen, die in die Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur eingehen, wird kurz erläutert.

In Abschnitt 2.7 werden Beispiele des Flusses fühlbarer Wärme aus heißer oder kalter Nahrung quantitativ dargestellt.

Die Bedeutung der Speicherung von fühlbarer Wärme und deren physiologische Konsequenzen werden in Abschnitt 2.8 angesprochen.

In Kapitel 3 wird ein Rechenmodell zur Lösung der Energiebilanzgleichung abgeleitet. Die dazu notwendige Quantifizierung der Energieflüsse vom Körperkern zur Hautoberfläche und von dort zur Kleidungsoberfläche wird in den Abschnitten 3.1 und 3.2 angesetzt. Der für den Wärmefluß durch die Kleidung bedeutende Wärmedurchgangswiderstand wird in Kapitel 4 eingehend diskutiert.

Zu Beginn des anwendungsorientierten zweiten Teiles der Arbeit erfolgt in Kapitel 5 nach der Ableitung der Ansätze für die einzelnen Arten des Wasserverlustes die Diskussion deren Abhängigkeit von den Umgebungs- luftbedingungen anhand von graphischen Darstellungen. Hierbei fällt vor allem der große Schwankungsbereich des Wasserverlustes durch die Transpiration auf.

Das Kapitel 6 ist der Wertung von thermisch-hygrischen Körperparametern in Bezug auf die Behaglichkeit gewidmet. Bei der Bewertung des thermischen Komforts sollten danach sowohl die mittlere Hauttemperatur, die Schweißrate als auch der Hautbenetzungsgrad berücksichtigt werden. Komfortgrenzwerte für diese Größen werden in Kapitel 6 angeführt.

Diese Bewertungsmöglichkeiten werden in Kapitel 7 auf spezifische Klimate angewandt. Dabei zeigt sich z.B.:

1. Im Raumklima (7.1) kommt der mittleren Strahlungstemperatur annähernd dieselbe Bedeutung für die Behaglichkeit zu wie der Lufttemperatur.
2. Während des Schlafes (7.2) kann durch die geeignete Wahl der Bedeckungsart und -weise thermischer Komfort in einem großen Bereich von Umgebungsluftbedingungen erreicht werden.
3. Im Polarklima (7.3.1) sind sehr hohe Wärmedurchgangswiderstände der Bekleidung notwendig (im Beispiel $I_{cl} \geq 2,5 \text{ clo}$), um einem Menschen im stationären Zustand das Überleben zu ermöglichen.
4. Im subtropischen Klima (7.3.2) erweist sich bei hohen solaren Strahlungsflußdichten mehr Kleidung als günstiger als weniger Kleidung.
5. In feuchttropischen Klimazonen (7.3.3) können zu hohe Aktivitätsstufen zu einer Überwärmung des Körpers und dadurch zum Hitzekollaps führen.
6. In großen Höhen (7.3.4) wirkt sich der niedrige Luftdruck weit weniger auf die Energetik eines Menschen aus als die sich stark von einer Tallage unterscheidenden anderen meteorologischen Parameter.

Im Anhang zu dieser Arbeit sind tabellarisch alle bedeutenden Größen des menschlichen Energiehaushaltes, die sich aus den Berechnungen zu den Kapiteln 5 und 7 ergeben, aufgelistet. In diesen Tabellen sind neben den schon vorher diskutierten Parametern jeweils die Kerntemperaturen und die einzelnen Energieflüsse für alle untersuchten Klimabedingungen zusammengestellt.

Liste der verwendeten Symbole

A	: Arbeit	(J)
A'	: atmosphärische Gegenstrahlung	(W m ⁻²)
A _{Be}	: bekleidete Oberfläche des Körpers	(m ²)
A _{Cl}	: Oberfläche des bekleideten Körpers	(m ²)
A _{Diff}	: an der Wasserdampfdiffusion beteiligte Oberfläche	(m ²)
A _{eff}	: Effektive Oberfläche für den Strahlungsaustausch mit der Umgebung	(m ²)
A _{Ko}	: Kontaktfläche des Körpers mit Festkörpern	(m ²)
A _{Du}	: Oberfläche des unbedeckten Körpers nach Dubois	(m ²)
A _p	: Projektionsfläche senkrecht zur Einstrahlung	(m ²)
A _{Un}	: unbedeckte Oberfläche des Körpers	(m ²)
AL	: Alter	(a)
AKT	: Aktivitätsumsatz des Körpers	(W)
AZV	: Atemzeitvolumen	(l h ⁻¹)
B'	: Wärmeflußdichte aus dem Boden	(W m ⁻²)
b	: Benetzungsgrad der Hautoberfläche	(%)
C	: Wärmefluß durch Konvektion	(W)
C _{Be}	: Wärmefluß durch Konvektion von der Kleidung	(W)
C _{Un}	: Wärmefluß durch Konvektion von der Haut	(W)
C _{Kd}	: Wärmefluß durch Konduktion	(W)
c _B	: spezifische Wärmekapazität des Blutes	(J kg ⁻¹ K ⁻¹)
c _p	: spezifische Wärmekapazität der Luft	(J kg ⁻¹ K ⁻¹)
c _N	: spezifische Wärmekapazität der Nahrung	(J kg ⁻¹ K ⁻¹)
c _K	: spezifische Wärmekapazität des Körpers	(J kg ⁻¹ K ⁻¹)
D	: diffuse Himmelstrahlung	(W m ⁻²)
d	: charakteristische Länge eines Körpers	(m)
E	: Ausstrahlung einer Oberfläche der Umgebung	(W m ⁻²)
E _{potB}	: potentieller latenter Wärmefluß durch Schweißverdunstung vom bekleideten Körperanteil	(W)
E _D	: Energiefluß durch Wasserdampfdiffusion	(W)
E _{Sw}	: Leistung der aktuellen Schweißverdunstung	(W)
ENA	: umsetzbarer Energieinhalt der Nahrung	(J)
E _{phys}	: physiologisch mögliche Schweißverdunstung	(W)
E _{pot}	: potentielle Schweißverdunstung des Körpers	(W)
E _{Re}	: Energiefluß in die Atemluft	(W)
E _{Ref}	: fühlbarer Anteil von E _{Re}	(W)

E_{Re1}	: latenter Anteil von E_{Re}	(W)
E_{potU}	: wie E_{potB} jedoch für den unbedeckten Körperanteil	(W)
$E(T)$	: Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur T ($^{\circ}C$)	(mb)
e_1	: Wasserdampfdruck der Umgebungsluft	(mb)
F_A	: Raumwinkelanteil des Himmels	
F_{ec}	: Durchlässigkeitskoeffizient der Kleidung für Wasserdampf	
F_i	: Raumwinkelanteil der Oberfläche i in Bezug auf einen Menschen	
F_{KH}	: Wärmefluß vom Körperkern zur Hautoberfläche	(W)
F_{KL}	: Wärmefluß durch die Kleidung	(W)
F_{KHD}	: konduktiver Anteil von F_{KH}	(W)
F_{KHV}	: konvektiver Anteil von F_{KH}	(W)
f_{cl}	: Vergrößerungsfaktor der Körperoberfläche durch die Kleidung	
f_{eff}	: Verhältnis der effektiven Strahlungsoberfläche zur gesamten Oberfläche des bekleideten Körpers	
f_p	: Projektionsfaktor der Körperoberfläche zur direkten Sonnenstrahlung	
GE	: Masse eines Menschen	(kg)
GR	: Körpergröße eines Menschen	(m)
GRU	: Grundumsatz	(W)
g	: Erdbeschleunigung	(m s ⁻²)
H	: Innere thermische Leistung	(W)
HZ	: Höhe eines Zylinders	(m)
h	: Sonnenhöhe	(Grad)
h_B	: Wärmeübergangszahl vom Kern zur Haut	(W m ⁻² K ⁻¹)
h_c	: Wärmeübergangszahl durch Konvektion	(W m ⁻² K ⁻¹)
h_c'	: Wärmeübergangszahl durch Konvektion in Meeresniveau	(W m ⁻² K ⁻¹)
h_e	: Wärmeübergangszahl durch Verdunstung	(W m ⁻² mb ⁻¹)
h_K	: konvektive Wärmeübergangszahl vom Kern zur Haut	(W m ⁻¹ K ⁻¹)
h_k	: Wärmeübergangszahl durch Konduktion	(W m ⁻² K ⁻¹)
I	: direkte solare Strahlung	(W m ⁻²)
I_o	: wie I , jedoch auf zur Einstrahlung senkrechte Fläche	(W m ⁻²)
I_{cl}	: Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung	(clo)
I_{clo}	: Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung bei Standardbedingungen	(clo)
I_e	: Effektivität des Schwitzens	
I_x	: Wärmedurchgangswiderstand des Kleidungsstückes x	(clo)

K	: langwellige Ausstrahlung des Körpers	$(W\ m^{-2})$
Kal	: kalorischer Sauerstoffwert	$(J\ l^{-1})$
L	: Fluß fühlbarer Wärme	(W)
L'	: Flußdichte der fühlbaren Wärme	$(W\ m^{-2})$
M	: Metabolische Rate	(W)
M _{shiv}	: Umsatzsteigerung bei Kältebelastung	(W)
m	: Wasserdampfdurchlässigkeitskoeffizient	$(kg\ (s\ m\ mb)^{-1})$
m _{cl}	: Kleidungswiderstand für die Wasserdampfdiffusion	$(s\ m\ mb\ kg^{-1})$
m _N	: Masse der Nahrung	(kg)
N	: Nahrungswärmefluß	(W)
p	: Luftdruck	(mb)
p _o	: Normluftdruck in Seehöhe	(mb)
Q	: Strahlungssaldo	(W)
Q'	: Flußdichte der Nettostrahlung	$(W\ m^{-2})$
Q _{Be}	: Strahlungssaldo der bekleideten Körperoberfläche	(W)
Q _{Un}	: Strahlungssaldo der unbekleideten Körperoberfläche	(W)
R	: Gesamtwärmedurchgangswiderstand	$(m^2K\ W^{-1})$
R ₁	: mittlerer Radius des unbekleideten Körpers für den bekleideten Körperanteil	(m)
R ₂	: mittlerer Radius des bekleideten Körpers für den bekleideten Körperanteil	(m)
R _{cl}	: Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung	$(m^2K\ W^{-1})$
R _D	: Wärmedurchgangswiderstand durch Diffusion	$(m^2mb\ W^{-1})$
R _{Ge}	: Wärmedurchgangswiderstand des Körpergewebes	$(m^2K\ W^{-1})$
R _{Ko}	: Wärmedurchgangswiderstand des Kontaktkörpers	$(m^2K\ W^{-1})$
RQ	: respiratorischer Quotient	
RH	: relative Luftfeuchtigkeit	$(\%)$
r'	: kurzwellige Reflexstrahlung	$(W\ m^{-2})$
r	: Verdunstungswärme von Wasser	$(J\ kg^{-1})$
R	: Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung	$(K\ m^2\ W^{-1})$
S	: Energiefluß in Speichermasse	(W)
SW	: Schweißrate	$(kg\ s^{-1})$
SW _F	: Schweißrate von Frauen	$(kg\ s^{-1})$
SW _{pot}	: potentiell verdunstende Schweißmenge	$(kg\ s^{-1})$
s	: spezifische Feuchte	
T _a	: Lufttemperatur der Umgebung	$(^{\circ}C)$
T _B	: gewichtete mittlere Körpertemperatur	$(^{\circ}C)$
T _B '	: Auslösetemperatur der Transpiration für T _B	$(^{\circ}C)$

T_c	: Temperatur des Körperkernes	(°C)
T_c'	: Auslösetemperatur der Transpiration für T_c	(°C)
T_{cl}	: mittlere Temperatur der Kleidungsoberfläche	(°C)
T_{ex}	: maximale Temperatur der Atemluft bei Verlassen des Körpers	(°C)
T_{exM}	: mittlere Temperatur der Atemluft bei Verlassen des Körpers durch den Mund	(°C)
T_{exN}	: mittlere Temperatur der Atemluft bei Verlassen des Körpers durch die Nase	(°C)
T_m	: gewichtetes Mittel der Körpertemperaturen	(°C)
T_{mrt}	: mittlere Strahlungstemperatur	(°C)
T_M	: mittlere Temperatur des gesamten Körpers	(°C)
T_N	: Temperatur der Nahrung	(°C)
T_{sk}	: mittlere Temperatur der Hautoberfläche	(°C)
T_{sk}'	: Auslösetemperatur der Transpiration für T_{sk}	(°C)
T_o	: Oberflächentemperatur	(°C)
T_v	: virtuelle Temperatur	(°C)
t	: Zeit	(s)
V	: Volumen	(m ³)
V'	: Flußdichte der latenten Wärme	(W m ⁻²)
v	: Windgeschwindigkeit	(m s ⁻¹)
v_r	: relative Windgeschwindigkeit	(m s ⁻¹)
V_B	: Bluttransport zur Körperoberfläche	(l s ⁻¹)
W	: Arbeitsleistung nach außen	(W)
WD	: Wasserverlust durch Diffusion	(g h ⁻¹)
WN	: mit der Nahrung aufgenommene Wassermenge	(g h ⁻¹)
WR	: Wasserverlust durch die Respiration	(g h ⁻¹)
WS	: Wasserverlust durch Transpiration	(g h ⁻¹)
WSp	: gespeicherte Wassermenge	(g h ⁻¹)
WV	: über die Verdauungswege ausgeschiedene Wassermenge	(g h ⁻¹)
Y	: Verhältnis der bekleideten Körperlänge zur gesamten Körpergröße	
z	: Verhältnis der bekleideten zur unbekleideten Körperoberfläche	
α	: Azimuthwinkel	(Grad)
α_{cl}	: kurzweilige Absorptionszahl der Kleidung	

α_{tr}	: kurzwellige Absorptionszahl	
α_{sk}	: kurzwellige Absorptionszahl der Haut	
ϵ_{sk}	: Emissionszahl der menschlichen Haut	
ϵ_{cl}	: Emissionszahl der Kleidung	
γ	: thermischer Ausdehnungskoeffizient der Luft	(K ⁻¹)
η	: Wirkungsgrad der physikalischen Arbeit	
ρ_l	: Dichte der Luft	(kg l ⁻¹)
σ	: Stefan-Boltzmann Konstante	5,67 · 10 ⁻⁸ (W m ⁻² K ⁻⁴)
ν	: kinematische Viskosität	(m ² s ⁻¹)
ρ_B	: Dichte von Blut	(kg l ⁻¹)

1 Einleitung

1.1 Geschichtlicher Überblick zur Bioenergetik in der Biometeorologie

Die Biometeorologie, die den Einfluß von atmosphärischen Vorgängen auf Lebewesen erforscht, ist eine Wissenschaft des 20. Jahrhunderts, wenngleich sich in der älteren Geschichte einige Ansätze dazu finden lassen.

Die Einsicht, daß das Klima, die Witterung oder das Wetter den Menschen, die Tiere und die Pflanzen beeinflusst, ist schon im Jahre 400 vor Christus von Hippocrates in seinem Buch "Luft, Wasser und Orte" festgehalten. In diesem Buch, das vor allem für angehende Ärzte gedacht war, warnt er z.B. vor möglichen Komplikationen bei Operationen, die während Wetterumschwüngen durchgeführt werden. Die erkannte Bedeutung atmosphärischer Erscheinungen wird auch aus der Tatsache deutlich, daß die Römer sowie die Griechen vor politischen Entscheidungen und Kriegszügen die "Wettergötter" befragten (nach Frisinger, 1977).

Auch A. v. Humboldt bezieht seine Definition des Klimas "... alle Veränderungen in der Atmosphäre, die unsere Sinne merklich affizieren..." im Jahre 1827 auf den Menschen und dessen Reaktionen auf die meteorologischen Parameter.

Knogler (1803) sieht in seinem Buch "Meteorologie" die Erforschung des Einflusses der Witterung auf die Gesundheit des Menschen als eines der Hauptziele der Meteorologie an. Die zielstrebige biometeorologische Forschung mit statistischen und physikalischen Methoden setzt jedoch erst im 20. Jahrhundert ein (Tromp, 1980).

Die Biometeorologie besitzt daher eine alte und eine neue Komponente. Die alte Komponente ist durch den starken Glauben des Menschen von den frühen Zeiten an begründet, daß ein großer Einfluß des Wetters und Klimas auf das menschliche Verhalten und Glück sowie die Entstehung von Krankheiten besteht. Die neue Komponente liegt in den neuen Methoden der Erforschung der schon vor langer Zeit beschriebenen Phänomene.

In der Zeit vor 1900 lag das Hauptgewicht der meteorologischen Forschung in der Erklärung von Erscheinungen in der Atmosphäre (Niederschlag, Regenbogen, Sonnendeklination etc.) und der Entwicklung der bedeutendsten Meßgeräte, die natürlich auch in der modernen Biometeorologie benötigt werden. Das erste rein biometeorologische Meßgerät ist das von Hill 1911 (nach Kassner, 1951) entwickelte Katathermometer.

Die meisten biometeorologischen Veröffentlichungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts befassen sich mit empirischen Studien Deutscher Ärzte über Beziehungen zwischen dem Ausbruch von Krankheiten und dem Klima. Als wegweisende Veröffentlichungen in dieser Richtung sind jene in Deutschland von de Rudder (1952) und in den USA von Petersen (1938) anzusehen, die sich schon moderner statistischer Methoden bedienten. Eine Fortsetzung dieser Arbeiten stellten die Veröffentlichungen von Donle (1956) und Abel et al. (1979, 1980) dar.

Nach 1930 begann in der Biometeorologie das Zeitalter der experimentellen Untersuchungen, in denen vor allem in den angelsächsischen Ländern und meist für militärische Zwecke Klimasituationen in Labors simuliert, und deren Einflüsse auf den Menschen gemessen wurden. Man begann den Menschen in Klimakammern bei verschiedenen Aktivitätsstufen zu studieren. Es wurde versucht, physiologische Größen in Abhängigkeit von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit, Nahrung und Kleidung meßtechnisch zu erfassen.

Eine rapide Entwicklung der Biometeorologie setzte nach dem 2. Weltkrieg ein. Während dieses Krieges war man zu der Erkenntnis gelangt, daß grundlegende Kenntnisse der meteorologischen Größen und deren Auswirkungen, z.B. bei extremer Witterung, auf den Menschen wichtig sind. Ein starker Impuls für die Biometeorologie ging auch von der nun beginnenden Raumfahrt aus, bei der der Mensch ebenso extremen Klimaten ausgesetzt ist.

Im Jahre 1956 wurde die Internationale Gesellschaft für Biometeorologie gegründet, um den weltweiten Gedankenaustausch und den Informationsfluß von Forschungsergebnissen zu fördern.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts bis heute bekam die physikalische Modellierung des menschlichen Körpers und der Interaktionen mit seiner Umgebung immer mehr Bedeutung. Den ersten Versuch, den Körper eines Lebewesens von einem thermodynamischen Standpunkt aus zu betrachten, machte 1911 Lefevre, indem er den Körper als Kugel mit einem wärmeproduzierenden Kern modellierte.

Die "Hochzeit" der Modellierungen setzte in den sechziger Jahren ein und überdauerte auch die Siebziger. Aus den einfachen Kugel- und Zylindermodellen wurden "viel Element Modelle", die sich aus vielen verschiedenen geometrischen Körpern zusammensetzen (Wissler, 1963, Stolk, 1970, Gagge et al., 1971, Gordon et al. 1977). An den einzelnen Elementen wurden verschiedene Schichten wie z.B. Kern-Muskelschicht-Haut unterschieden (Crosbie et al, 1963; Atkins et al., 1969; Stolk, 1970; Gordon, 1977; Hörschele, 1970).

Einen weiteren Schritt zur genaueren Modellierung der Vorgänge am und im Körper lieferte die Berücksichtigung zusätzlicher physiologischer Elemente wie die Blutzirkulation, der Gegenstromwärmeaustausch von Blutgefäßen, der Wärmeverlust durch Atmung und Transpiration u.ä. (Wissler, 1963, Stolwijk, 1970). Ein Vergleich und eine Wertung der bedeutendsten dieser Modelle wird von Berglund et al. (1978) durchgeführt.

Neben den Modellierungen gewannen aber auch groß angelegte experimentelle Untersuchungen (Fanger, 1972, Rohles et al., 1971) mit jeweils über 1000 Testpersonen an Bedeutung. Mit Hilfe dieser Testreihen sollten vor allem empirische Werte für physiologische Größen wie z.B. die Hauttemperatur, die Schweißrate oder das thermische Befinden gefunden werden.

Ein wesentliches Ziel der biometeorologischen Forschung war und ist es heute noch, für eine durch die meteorologischen Parameter vorgegebene Situation eine Prognose über das thermische Wohlbefinden zu machen. Dazu wurden vor allem in diesem Jahrhundert eine Vielzahl von Kenngrößen, wie die Äquivalenttemperatur, effektive Temperatur, operative Temperatur oder verschiedenste Abkühlungsgrößen definiert (Givoni, 1964). Ein Mangel der meisten dieser Größen besteht darin, daß sie entweder einige für die Behaglichkeit bedeutende meteorologische, physiologische oder durch das Verhalten begründete Parameter wie z.B. die Kleidung, Schweißverdunstung oder die Strahlung der Umgebung nicht berücksichtigen. Sie sind daher nur für eng begrenzte Situationen anwendbar. Die universellste Form der Darstellung des thermisch-hygrischen Wirkungskomplexes ist die Energiebilanzgleichung des gesamten Körpers, aus der je nach Fragestellung eine Vielzahl von biometeorologischen Kenngrößen abgeleitet werden können. In der Energiebilanzgleichung werden alle bedeutenden thermischen Größen erfaßt und in Form der jeweiligen Energieflüsse widerspiegelt. Sie sollen in der vorliegenden Arbeit erläutert, auf biophysikalischen Methoden basierend modelliert und quantifiziert werden.

1.2 Die Energiebilanzgleichung des Menschen

Die Energiebilanzgleichung des Menschen beruht auf dem 1. Hauptsatz der Wärmelehre, der in seiner allgemeinen Form zuerst von Mayer im Jahre 1867 aufgestellt wurde. Mayer, der Arzt und Physiker war, kam durch Experimente am menschlichen Körper zu seinen bedeutenden Aussagen. Ausgehend von diesen grundlegenden Erkenntnissen wurde von Albrecht (1930) die Energiebilanzgleichung der Erdoberfläche in die Meteorologie eingeführt, in der die Energieflüsse zur Oberfläche (Vorzeichen +) und von der Oberfläche (Vorzeichen -) addiert werden. Die allgemein verwendete Bezeichnung "Energiebilanzgleichung" für (1) müßte richtiger "Bilanzgleichung der Energieflüsse", die die Dimension einer Leistung haben, heißen. Da sich der Name "Energiebilanzgleichung" jedoch im Sprachgebrauch festgesetzt hat, soll er hier beibehalten werden.

$$Q' + B' + L' + V' = 0 \quad (1),$$

wobei Q' der Strahlungssaldo, B' der Bodenwärmestrom, L' der Strom fühlbarer Wärme und V' der Strom latenter Wärme sind. Die mit ' gekennzeichneten Energieflüsse haben die Dimension W/m^2 , während die im weiteren diskutierten Energieflüsse am Menschen auf den Gesamtkörper bezogen werden und die Dimension W haben.

Um die Energieflüsse eines Menschen zu bilanzieren, ist es zweckmäßig von einer Oberflächenbilanz auf eine Volumenbilanz überzugehen, bei der auch die Speicherung von thermischer Energie in der Körpermasse und Energiequellen berücksichtigt werden können. Danach ergibt sich der Energieinhalt E_I des Körpervolumens zu:

$$E_I = \int_V e_D \cdot dV \quad (2).$$

In (2) steht E_I für den Energieinhalt des Körpers, e_D für die Energiedichte im Körper und V für das Volumen des Körpers.

Die Änderung des Energieinhaltes des Körpers berechnet sich danach zu:

$$dE_I / dt = d/dt \int_V e_D \cdot dV = \int_V (\partial e_D / \partial t + \text{div}(e_D \cdot \vec{v})) \cdot dV \quad (3).$$

Nach Anwendung des Integralsatzes von Gauß ergibt sich:

$$dE_I / dt = \int_V \partial e_D / \partial t \cdot dV + \int_O \vec{v} \cdot e_D \cdot dO \quad (4),$$

wobei O die geschlossene Oberfläche des Menschen und v eine Geschwindigkeit sind.

Das in (4) angeführte Volumenintegral entspricht nun einer Energiequelle, während das Oberflächenintegral die Energieflüsse durch die Oberfläche beschreibt. Der Energiequelle entspricht beim Menschen die Verbrennungswärme der Nahrung, die Flüsse durch die Oberfläche setzen sich aus fühlbaren, latenten und aktinischen Anteilen zusammen. Um dem 1. Hauptsatz der Wärmelehre gerecht zu werden muß noch die Arbeitsleistung nach außen berücksichtigt werden.

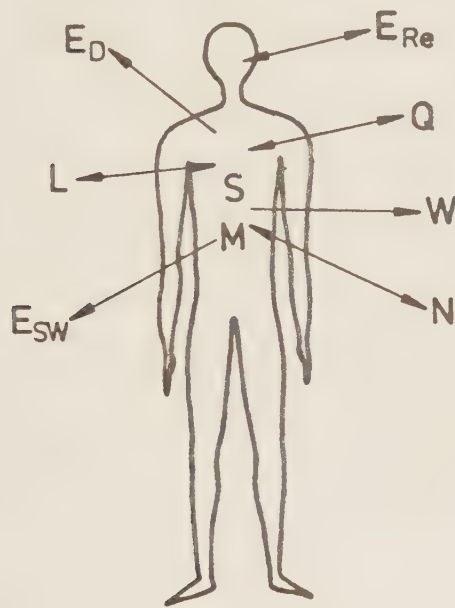


Abb.1: Energieflüsse des menschlichen Körpers

Setzt man die einzelnen Wärmeflüsse, wie allgemein üblich, getrennt an und setzt bei Energiegewinn ein positives und bei Energieverlust ein negatives Vorzeichen, so folgt aus dem 1. Hauptsatz die Energiebilanzgleichung eines Menschen in der Form:

$$M + W + Q + L + E_D + E_{Sw} + E_{Re} + N + S = 0 \quad (5),$$

wobei M die metabolische Rate, W die Arbeitsleistung nach außen, Q der Strahlungssaldo des Körpers, L der Fluß fühlbarer Wärme, E_D der Wärmefluß durch Wasserdampfdiffusion, E_{Sw} der Wärmefluß durch Schweißverdunstung, E_{Re} der Atemwärmefluß, N der fühlbare Wärmefluß aus der

Nahrung durch Anpassung der Nahrung an die Kerntemperatur und S der Speicherwärmefluß durch Veränderung der Körpertemperatur sind.

Die Summe der Terme M und W wird i. a. als innere Wärme H bezeichnet.

Die Energieflüsse des menschlichen Körpers sind in Abbildung 1 mit ihren möglichen Flußrichtungen dargestellt.

Die nähere Beschreibung der einzelnen Terme der Energiebilanzgleichung des Menschen und deren Berechnungsverfahren werden in den folgenden Abschnitten dieser Arbeit erläutert.

2 Die Energieflüsse des Menschen

2.1 Die metabolische Rate

Durch die metabolische Rate wird innere Wärme erzeugt und Energie zur Arbeitsleistung nach außen zur Verfügung gestellt. Sie ist die einzige beständige Energiequelle des Menschen. Durch sie wird auch im Ruhestadium ständig aus der aufbereiteten Nahrung Energie erzeugt. Alle anderen Energieflüsse sind in gewöhnlichen Außen- und Raumklimaten Energiesenken. Die metabolische Rate M umfaßt den Grundumsatz GRU (siehe 2.1.1), der auch als Ruheumsatz bezeichnet wird, und den Aktivitätsumsatz AKT (siehe 2.1.2).

$$M = GRU + AKT \quad (6).$$

Nach Lehmann (1953) sind die bedeutendsten Energieträger der menschlichen Nahrung die Kohlenhydrate und Fette. Von untergeordneter Bedeutung sind in dieser Hinsicht die Eiweiße (Proteine).

In den Muskeln und in den inneren Organen werden die Kohlenhydrate und Fette oxidativ gespalten und zu Kohlensäure und Wasser umgewandelt. Bei der Oxidation von 1g Kohlenhydrat werden 17,2 kJ, bei der Oxidation von 1g Fett 38,9 kJ und bei der Oxidation von 1g Eiweiß 17,2 kJ freigesetzt (Lehmann, 1953). Eine Berechnung der erzeugten inneren Energie durch den Metabolismus über einen längeren Zeitraum (Tage, Wochen) ist daher bei genauer Kenntnis der Zusammensetzung der Nahrung leicht möglich.

Da in dieser Arbeit jedoch nur die momentanen Werte der Energieflüsse für eine bestimmte Situation in Form der Leistung dargestellt werden sollen, muß zur Berechnung der metabolischen Rate ein indirektes Verfahren angewandt werden. Es ist nicht möglich, die Mengen der gerade "verbrennenden" Stoffe und die dabei frei werdende Energie zu messen. Daher ist man dazu übergegangen den Brennstoff (O_2) und die Abfallprodukte (CO_2) der Oxidation quantitativ zu bestimmen.

Nach Lehmann (1953) besitzt der menschliche Körper keine Sauerstoffdepots und muß daher den zur Oxidation benötigten Sauerstoff vollständig der Atemluft entnehmen. Ebenso wird das bei der Verbrennung entstehende Kohlendioxid gewöhnlich sofort bei der nächsten Expiration ausgeschieden.

Unter Berücksichtigung der chemischen Reaktionsgleichungen der Oxidationsprozesse und durch die Analyse der Inspirations- sowie der Expirationsluft kann bestimmt werden, welcher Energieträger gerade an

der Verbrennung beteiligt ist. So ergibt sich z.B. bei reiner Kohlehydratverbrennung ein Verhältnis der gebildeten CO_2 Moleküle zu den verbrauchten O_2 Molekülen, der sogenannte "respiratorische Quotient" RQ, von 1,0 und bei reiner Fettverbrennung von 0,7 (Munn, 1970). Nach Lehmann (1953) werden, um 1g Fett zu verbrennen, 2 Liter O_2 verbraucht. Diese Oxidation liefert, wie schon angegeben, 38,9 kJ. Die Verbrennung von 1 g Kohlehydrat benötigt nur 0,8 Liter O_2 und liefert 17,2 kJ. Das bedeutet, daß der Sauerstoff je nach Energieträger verschiedene "kalorische Werte" KAL hat.

Bei der metabolischen Rate liegt im Regelfall eine Verbrennung von beiden Energieträgern, Fetten und Kohlehydraten, vor. Der respiratorische Quotient RQ liegt dann zwischen 0,7 und 1,0. Nach Lehmann (1953) kann zu jedem RQ ein kalorischer Wert KAL des verbrauchten Sauerstoffes angegeben werden.

Tab.1: Kalorischer Wert KAL eines Liters des verbrauchten Sauerstoffes bei verschiedenen respiratorischen Quotienten RQ nach Lehmann (1953).

RQ	0,7	0,8	0,9	1,0
KAL (kJ/l)	19,6	20,1	20,6	21,1

Nach Munn (1970) verbraucht ein durchschnittlicher Mann in Ruhe ca. 250 ml Sauerstoff pro Minute, was in etwa einer metabolischen Rate von 83 W entsprechen würde.

Die Nichtberücksichtigung des Eiweißes, das zwar einen RQ - Wert von 0,8 besitzt, aber nur einen vergleichsweise kleinen Mengenanteil darstellt, führt nach Lehmann (1953) bei gemischter Kost zu einem Fehler, der kleiner als der Meßfehler bei der Analyse der Respirationsluft ist. Mit dem beschriebenen Analyseverfahren der Respirationsluft kann die Leistung der Nahrungsoxidation (metabolische Rate) zu jedem beliebigen Zeitpunkt durch Messung angegeben werden.

2.1.1 Der Grundumsatz

Das Minimum der metabolischen Rate zur Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen wird allgemein als "Grundumsatz" oder "Ruheumsatz" bezeichnet. Er hängt von der körperlichen Beschaffenheit einer Person, im einzelnen von der Körpermasse GE, von der Körpergröße GR, vom Alter AL und vom Geschlecht ab. Nach Kleiber (1967), dessen empirische Ansätze auf Untersuchungen mit mehreren hundert Probanden basieren, ergibt sich der Grundumsatz für Männer zu:

$$\text{GRU} = 3,45 \cdot \text{GE}^{0,75} \cdot (1,000 + 0,004 \cdot (30 - \text{AL}) + 0,010 \cdot (Z - 43,4)) \quad (7),$$

und für Frauen zu:

$$\text{GRU} = 3,19 \cdot \text{GE}^{0,75} \cdot (1,000 + 0,004 \cdot (30 - \text{AL}) + 0,018 \cdot (Z - 42,1)) \quad (8),$$

$$\text{wobei } Z = \text{GR} \cdot 100 / \text{GE}^{0,33} \quad (9).$$

In (7), (8) und (9) sind GE in kg, GR in m und AL in a anzugeben. GRU ergibt sich dann in W.

Für einen 30-jährigen Mann mit einer Masse von 80 kg und einer Körpergröße von 1,8 m ergibt sich ein Grundumsatz von 90,8 W, für eine gleichalte Frau mit einem Gewicht von 60 kg und einer Körpergröße von 1,6 m ein Grundumsatz von 67,3 W.

Um eine auf die Körperoberfläche normierte Leistung zu erhalten, müssen die Werte für GRU durch die jeweilige Körperoberfläche dividiert werden. Zur Berechnung der Körperoberfläche eignet sich der empirische Ansatz von DuBois (1915). Die Körperoberfläche nach DuBois A_{Du} berechnet sich zu:

$$A_{\text{Du}} = 0,203 \cdot \text{GE}^{0,425} \cdot \text{GR}^{0,725} \quad (10).$$

Die Normierung des Grundumsatzes auf 1 m^2 der Körperoberfläche ist angebracht, weil damit ein Vergleich der Werte von GRU mit entsprechend angegebenen Werten in der Literatur (z.B. Fanger, 1972; Spitzer et al., 1982) möglich wird. In den Abbildungen 2, 3 und 4 werden die Grundumsätze nach Fanger (1972) und Kleiber (1967) in Abhängigkeit

von der Körpergröße GR, von der Körpermasse GE und vom Alter am Beispiel eines Mannes und einer Frau dargestellt.

Aus ihnen geht hervor, daß die Ruheumsätze des Mannes nach Kleiber, mit Ausnahme bei höherem Alter, immer über denen nach Fanger liegen. Beim Ruheumsatz der Frau treten im mittleren Alter kaum Unterschiede zwischen beiden Ansätzen auf. Bei sehr jungen Frauen liegen die Werte nach Kleiber höher, während sich bei älteren Frauen diese Relation umkehrt.

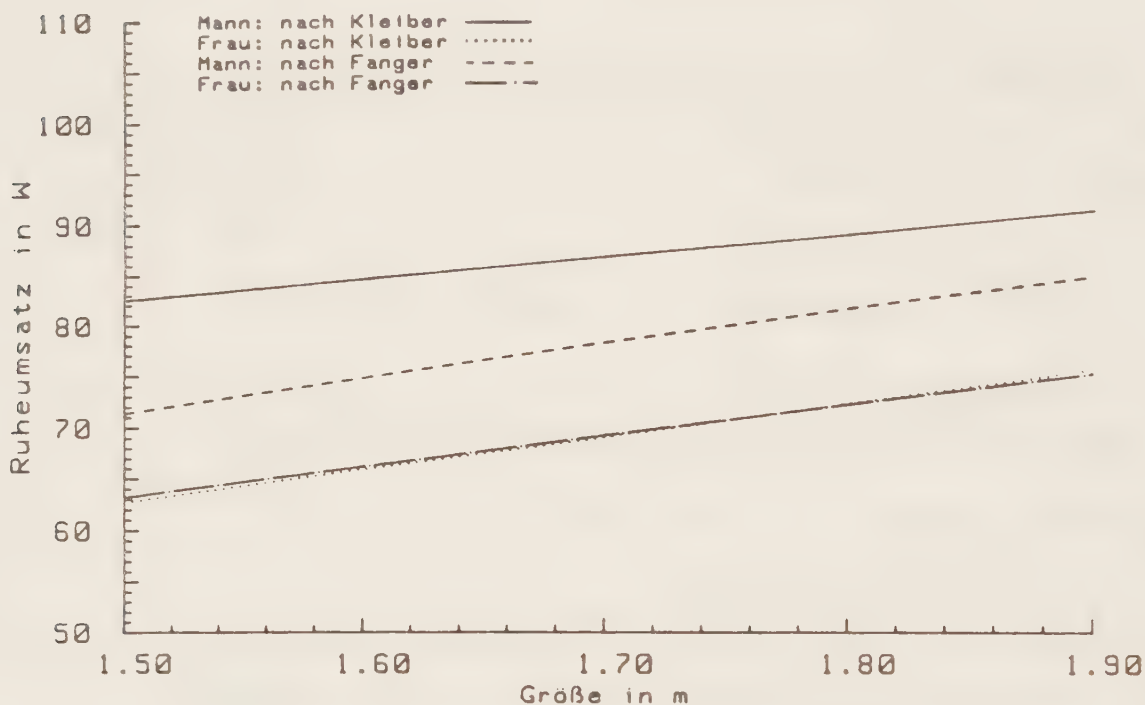


Abb. 2 : Grundumsätze GRU von Mann und Frau in Abhängigkeit von der Körpergröße GR (nach Kleiber, 1967 und Fanger, 1972).

AL= 30 Jahre, GE= 60 kg bzw. 80 kg.

Die auf 1 m^2 normierten Grundumsätze GRUN ergeben sich für einen Mann in W/m^2 zu:

$$\text{GRUN} = 17,00 \text{ GE}^{0,325} \text{ GR}^{-0,725} (1,000 + 0,004 (30 - \text{AL}) + 0,010 (Z - 43,4)) \quad (11),$$

und für eine Frau zu:

$$\text{GRUN} = 15,71 \text{ GE}^{0,325} \text{ GR}^{-0,725} (1,000 + 0,004 (30 - \text{AL}) + 0,018 (Z - 43,4)) \quad (12).$$

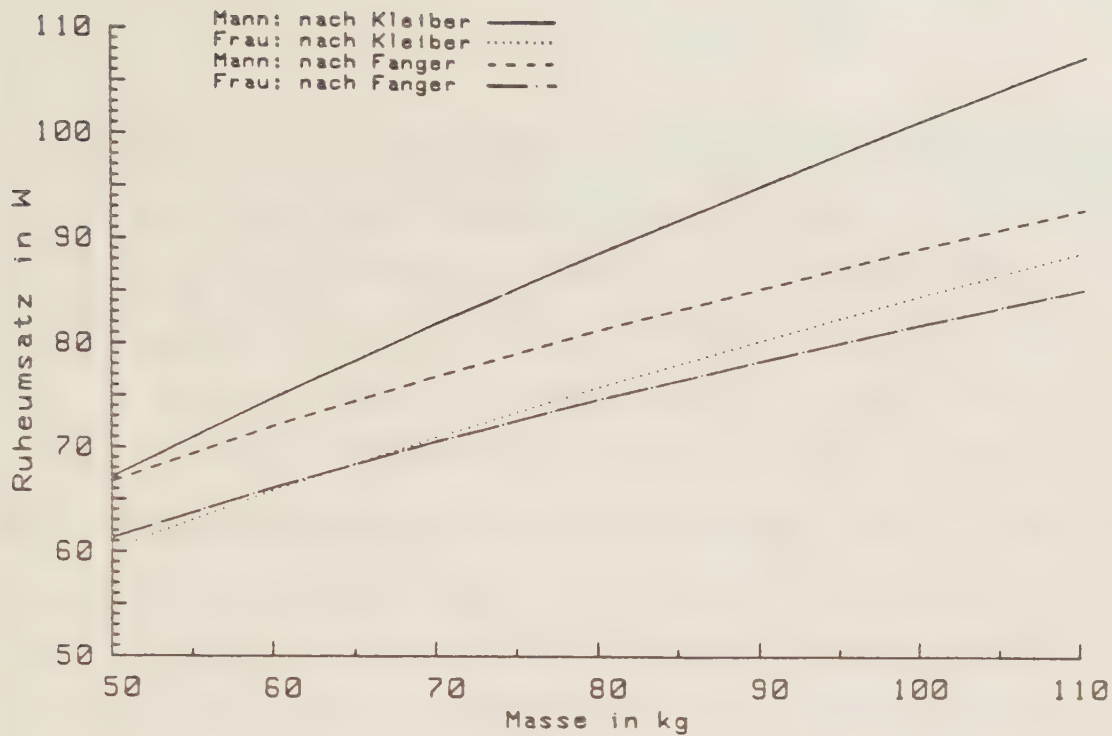


Abb.3 : Grundumsätze GRU von Mann und Frau in Abhängigkeit von der Körpermasse GE (nach Kleiber, 1967 und Fanger, 1972).
 AL= 30 Jahre, GR= 1,60 m bzw. 1,80 m.

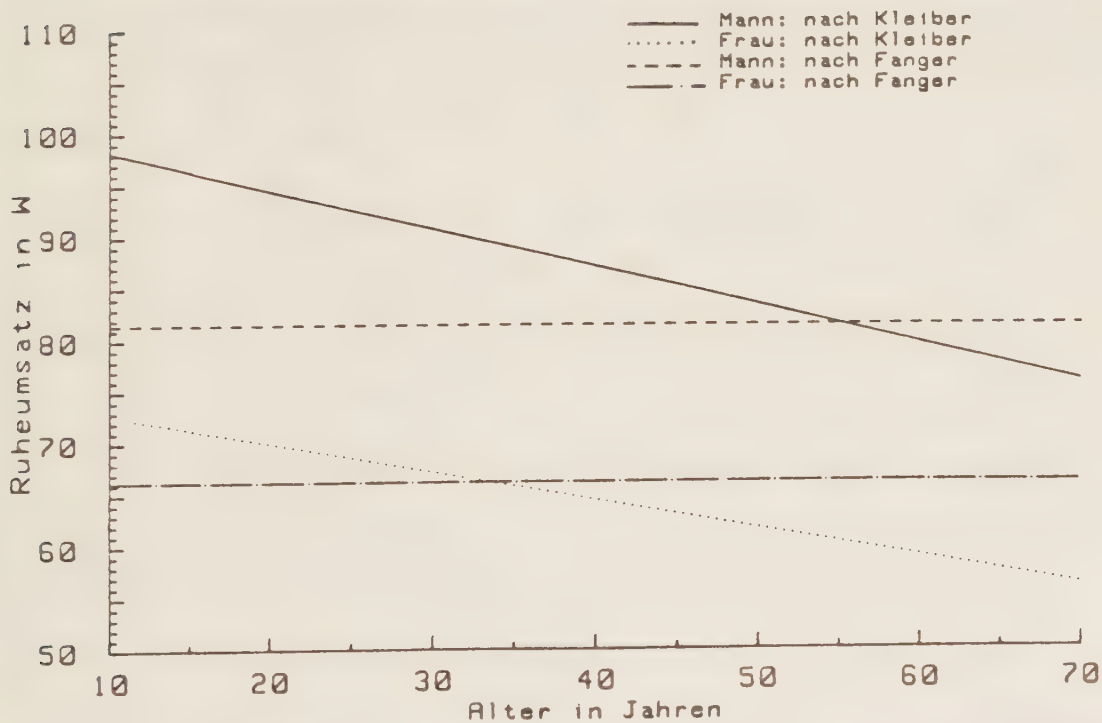


Abb.4 : Grundumsätze GRU von Mann und Frau in Abhängigkeit vom Alter AL (nach Kleiber, 1967 und Fanger, 1972).
 GR= 1,60 m bzw. 1,80 m, GE= 60 kg bzw. 80 kg.

Aus (11) und (12) geht hervor, daß der normierte Grundumsatz mit steigendem Körpergewicht zunimmt und mit wachsender Körpergröße abnimmt. Diese Formeln stellen einen gewissen Widerspruch zu Fanger (1972) dar, der die metabolische Rate nur als Funktion der Körperoberfläche A_{Du} darstellt, und zu Hensel (1955), der die metabolische Rate nur als Funktion des Körpergewichtes sieht. Das Alter geht bei beiden Autoren nicht in die Berechnungen ein, obwohl gerade dessen Berücksichtigung zum Verständnis von altersspezifischen Befindensäußerungen führen kann.

Die lokale Verteilung der durch den Metabolismus erzeugten Leistung wird in der Tabelle 2 an einem Beispiel nach Lehmann (1953) aufgezeigt. Daraus geht hervor, daß selbst beim ruhenden Körper mehr als 1/3 der Energie in der Muskulatur erzeugt wird. In der selben Größenordnung steuern die Verdauungsorgane zur Wärmeerzeugung bei. Zu klären ist dabei sicher noch die Frage, wie sich die genannte Verteilung kurz nach der Nahrungsaufnahme verändert. Nach Hentschel (1982) steigt die metabolische Rate während der Nahrungsaufnahme um ca.10% des Ruheumsatzes.

Tab.2: Verteilung des Grundumsatzes im Körper eines 35 jähr. ruhenden Mannes mit einer Körpermasse von 75 kg und einer Körpergröße von 1,70 m auf die wesentlichen Organe (nach Lehmann, 1953).

Organ	Anteil an GRU (W)	Anteil an der Gesamtleistung (%)	spez. Leistung (W/kg)
gesamt	83,7	100	1,1
Muskeln	31,8	38	1,3
Leber	10,4	12	4,0
Magen-Darm	6,4	8	2,2
Nieren	6,3	8	11,9
Milz	5,3	6	2,2
Herz	3,7	4	5,8
Gehirn	2,5	3	2,5
Pankreas	1,1	1	4,8
Blut	0,9	1	0,1
Speicheldrüsen	0,6	1	3,9
andere Organe	14,7	18	0,5

Bei sehr kühlen Bedingungen kann sich nach Gagge et al. (1970), Azer et al. (1977) und Davis (1974) der Grundumsatz eines Menschen erhöhen. Diese Steigerung erreicht ihr Maximum durch aktives Zittern (shiver). Gagge et al. (1971) geben die Umsatzsteigerung M_{shiv} bei Kältebelastung als empirische Funktion der Haut- T_{sk} und der Kerntemperatur T_c an (13).

$$M_{shiv} = 19,4 (34,0 - T_{sk}) (37,0 - T_c) A_{Du} \quad (13),$$

wobei negative Werte von M_{shiv} zu 0 gesetzt werden.

Nach Azer (1977) berechnet sich M_{shiv} zu:

$$M_{shiv} = 20,0 (32,5 - T_{sk}) (36,9 - T_c) + 5,0 (32,5 - T_{sk}) \quad (14),$$

wobei bei Kerntemperaturen $T_c < 37,0^\circ\text{C}$ M_{shiv} immer zu 0 gesetzt wird. Nach Kleiber (1967) ist das Zittern eine verschwenderische Art, den Körper in Kälte warm zu halten, da das Zittern den inneren und den äußeren Widerstand des Menschen gegen die Wärmeabgabe verringert. Er vergleicht dies mit dem Öffnen eines Fensters, um die Heizleistung des Ofens durch Frischluftzufuhr zu steigern.

2.1.2 Der Aktivitätsumsatz

Zu dem Ruheumsatz an innerer Energie im menschlichen Körper addiert sich der sogenannte Aktivitätsumsatz, sobald eine Tätigkeit verrichtet wird, d.h. der Mensch sich nicht in Ruhe befindet.

Die Größe dieser additiven Energieumwandlung hängt je nach Art der Aktivität von den Körpermerkmalen und von der Aktivität und den dazu erforderlichen Bewegungsformen ab. Bei körperlicher Arbeit verlagert sich der Ort der metabolischen Energieumsetzung zunehmend auf die Muskulatur, in der bei sehr harter Arbeit bis zu 95% (Lehmann, 1953) der Energie gewonnen werden. Die Bedeutung der inneren Organe für den Metabolismus tritt zurück, das Herz jedoch, das nun zu gesteigerter Leistung angeregt wird, nimmt einen großen Anteil ein. Nach Lehmann (1953) spricht viel dafür, daß hohe geistige Leistungen zu einem hohen spezifischen Metabolismus in den beteiligten Gehirnregionen führen, aufgrund des relativ geringen Anteiles am Gesamtkörper jedoch vernachlässigbar sind.

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von tabellarischen Zusammenstellungen von metabolischen Raten bei verschiedenen Tätigkeiten (Spitzer et al., 1982; Fanger, 1972; Lehmann, 1953; Wenzel et al., 1980; Turner, 1955). Leider sind darin die Angaben der metabolischen Raten als Leistungen in Watt ohne Rücksicht auf Geschlecht und Körperbeschaffenheit angegeben oder auf die Oberfläche des Körpers normiert. Nach Lehmann (1953) ist jedoch bei gleicher Aktivität die metabolische Rate von Frauen ca. 15% niedriger anzusetzen als bei Männern, auch dann wenn sie gleiche Körpermaße besitzen.

Nach Hettinger (1982) ergeben sich diese Unterschiede jedoch nur aus den unterschiedlichen Grundumsätzen. Die Aktivitätsumsätze von Mann und Frau unterscheiden sich danach bei gleicher Aktivität und gleicher Körpermasse nicht signifikant. Die Körpermasse spielt nur dann eine Rolle, wenn bei einer bestimmten Aktivität große Teile des Körpers mitbewegt werden (z.B. gehen). Diese Abhängigkeit von der Körpermasse wird in der Tabelle 3 durch die Angabe des spezifischen Grundumsatzes in W/kg berücksichtigt. Daher ist die generelle Aussage von Lehmann (1953), daß der Gesamtumsatzes von Frauen um 15% niedriger ist, sicher nur bei leichteren Aktivitäten haltbar. Bei leichten Aktivitäten stellt der Grundumsatz den bedeutendsten Anteil des Gesamtumsatzes dar.

Um die metabolische Rate möglichst individuell zu erfassen, wird hier folgendes Verfahren vorgeschlagen. Man geht von den nach Kleiber (1967) berechneten Grundumsätzen GRU aus, die von Geschlecht, Alter, Körpergröße und Körpermasse abhängen. Dann addiert man den Aktivitätsumsatz AKT der entsprechenden Tätigkeit.

Diese Berechnungsweise unterscheidet sich erheblich von häufig in der Literatur verwendeten Ansätzen (z.B. Fanger, 1972), die den Gesamtumsatz für eine bestimmte Tätigkeit in W/m^2 auf die Körperoberfläche normiert angeben, oder als Vielfaches des Umsatzes beim Sitzen wiedergeben. Im Falle der Oberflächennormierung entsteht ein Fehler nicht nur dadurch, daß der Grundumsatz nicht streng proportional zur Oberfläche ist, sondern auch durch die Tatsache, daß je nach Aktivität keine, oder nur eine indirekte Abhängigkeit des Arbeitumsatzes von der Oberfläche über die Abhängigkeit von der Körpermasse vorliegt. Bei der häufig in der Literatur gebrauchten Darstellung der metabolischen Rate als Vielfaches des Umsatzes beim Sitzen (z.B. Jendritzky et al., 1981) ergibt sich bei gleichen Aktivitäten, wenn der

Aktivitätsumsatz unabhängig von der Körperkonstitution eines Menschen ist, bei einer Person mit einem niedrigen Grundumsatz ein hoher Multiplikator und bei einer Person mit einem hohen Grundumsatz ein wesentlich kleinerer Multiplikator.

In der Tabelle 3 sind die Aktivitätsumsätze AKT und die metabolischen Raten für einen Mann und eine Frau für ausgewählte Aktivitäten angegeben. Sie wurden aus Veröffentlichungen von Spitzer et al. (1982) und Hettinger (1980) abgeleitet. Die als Beispiele ausgewählten zwei Personen sind in der Legende zu der Tabelle 3 näher charakterisiert. Die in Tabelle 3 angegebenen Arbeitssumsätze geben teilweise nur eine grobe Näherung an. Die genaue Angabe ist oft nicht möglich, da der Aktivitätsumsatz natürlich stark von der Art und Weise und der Geschwindigkeit der Arbeitsverrichtung abhängt. Am gesichertsten sind die Umsatzwerte bei ruhigen Tätigkeiten anzusehen, da hierzu die meisten Messungen durchgeführt wurden, und auch der individuelle Unterschied der Durchführung minimal ist.

Mit Hilfe von Tabelle 3 läßt sich der tägliche Nahrungsbedarf eines Menschen abschätzen. Der benötigte Energieinhalt ENA (J) der Nahrung ergibt sich zu:

$$\text{ENA} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot t_i \quad (15),$$

wobei M_i die metabolische Rate der Tätigkeit i ist und t_i die Andauer der Tätigkeit in s angibt. Die Summe aller t_i muß einen vollen Tag umfassen.

Zwischen den beiden oft zu Verwechslung und zu Mißverständnissen führenden Größen, nämlich dem Energieinhalt der Nahrung und der aktuellen Metabolischen Rate ist folgende Unterscheidung zu treffen. Erstere Größe hat die Dimension einer Energie (J), die metabolische Rate dagegen ist eine Leistung (W). Der Mensch versorgt sein "Kraftwerk" schubweise zu den Mahlzeiten mit dem Brennstoff Nahrung. Die Nahrung wird nicht sofort gänzlich in Wärme umgesetzt, sondern stetig den Erfordernissen angepaßt umgewandelt. Die in der Nahrung enthaltene Energie hat demnach keinen direkten Einfluß auf die aktuelle Wärmeerzeugung im Körper, sie stellt vielmehr eine begrenzende Größe dar.

Tab.3: Der Aktivitätsumsatz AKT und die metabolischen Raten M zweier Personen bei verschiedenen Tätigkeiten (nach Spitzer et al, 1982; Hettinger et al., 1980; Hettinger, 1982; Kleiber, 1967)
Mann: Alter 30 Jahre, Masse 75 kg, Größe 1,80 m;
Frau: Alter 30 Jahre, Masse 65 kg, Größe 1,65 m;

Art der Tätigkeit	AKT (in W)	M Mann (in W)	M Frau (in W)
a. unabhängig von der Körpermasse			
Schlafen	0	87	72
Sitzen auf einem Stuhl	25	112	97
Ruhig stehen	43	130	115
Knien	33	120	105
Ergometerarbeit (Fahrrad)			
Leistung 20W	127	214	199
40W	180	267	252
60W	252	339	324
80W	321	408	393
100W	431	518	503
120W	538	625	610
140W	631	718	703
160W	715	802	787
Gewichtheben mit beiden			
Händen von 0 auf 100 cm			
10 kg Last, 10 Hübe/Min	399	486	471
30 kg Last, 10 Hübe/Min	902	989	974
Autofahren, Innenstadt			
Hauptverkehrszeit	224	311	296
Allgemeine Büroarbeit	110	197	182
Maschineschreiben (elektr.)	84	171	156
Bergbau, schaufeln in ge-			
bückter Haltung, Last 11 kg,			
8 Hübe/Min	393	480	465
Bohrloch mit Hammer und			
Meißel schlagen (Brusthöhe)	322	409	394
Schmieden, Hammer 5,5 kg,			
30 Schläge/Min	793	880	865

Fortsetzung von Tabelle 3:

Art der Tätigkeit	AKT (in W)	M Mann (in W)	M Frau (in W)
Fällen von Bäumen mit Hand- säge 43-48 Doppelzüge/Min	625	712	697
Malerarbeiten, Innenanstrich	217	304	289
Hobeln, Hartholz	635	722	707
Bügeln	277	364	349
Essen im Sitzen	42	129	114
Fußballspielen	918	1005	990
Volleyball	511	598	583
Brustschwimmen 28 m/Min	461	548	533
Rudern, Wettkampf	1720	1807	1792
Schiabfahrt	610	697	682
Schiabfahrt, Wettkampf	3106	3193	3178
Slalom	1607	1694	1679
Squash	633	720	705
Tennis	413	500	485
Tischtennis	331	418	403
Tanzen, Walzer	354	441	426

b. abhängig von der Körpermasse

Gehen, Ebene, glatter Weg

Geschwindigkeit 2 km/h	1,2/kg	177	150
4 km/h	2,3/kg	260	222
6 km/h	3,5/kg	350	300
8 km/h	4,6/kg	432	371

Aufwärtsgehen, schiefe Ebene
glatter Weg

Steig. 5 Grad	Geschw. 2km/h	2,2/kg	252	215
5 Grad	4km/h	4,3/kg	410	352
10 Grad	2km/h	3,0/kg	312	267
10 Grad	4km/h	6,0/kg	537	462
15 Grad	1km/h	2,0/kg	237	202
15 Grad	2km/h	3,9/kg	380	326

Fortsetzung von Tabelle 3:

Art der Tätigkeit	AKT (in W)	M Mann (in W)	M Frau (in W)
Abwärtsgehen, schiefe Ebene glatter Weg, Geschw. 5 km/h			
Steig. 5 Grad	2,2/kg	252	215
10 Grad	1,9/kg	230	196
Aufwärtsgehen, schiefe Ebene glatter Weg			
Steig. 20 Grad	2,8/kg	297	254
30 Grad	3,9/kg	380	326
Gehen, verschiedener Boden Geschwindigkeit 4 km/h			
Landstraße	3,1/kg	320	274
Grasweg	3,3/kg	334	287
Schotter	4,2/kg	402	345
Fichtennadelboden	4,4/kg	417	358
Gepflühtes Feld	4,9/kg	455	391
Morastiger Untergrund	9,2/kg	777	670
leicht vereiste Straße	3,6/kg	357	306
5 - 10 cm tiefer Schnee	8,9/kg	755	651

Wenn zu wenig Energie aus der Nahrung zur Verfügung steht und keine körpereigenen Reserven vorhanden sind, muß die metabolische Rate sinken. Nimmt der Mensch zu viel Energie mit der Nahrung auf, so wird ein Teil in Form von Körperfett gespeichert, ein anderer Teil ungenutzt ausgeschieden. Über einen längeren Zeitraum von mehreren Tagen muß das zeitliche Integral über die metabolische Rate eines Menschen der mit seiner Nahrung aufgenommenen verwertbaren Energie entsprechen.

Der Vergleich der Wärmeerzeugung des Menschen mit der Beheizung eines Hauses soll das Gesagte noch einmal verdeutlichen. Der Nahrung des Menschen entsprechen die im Keller gelagerten Kohlen. Der metabolischen Rate entspricht die momentane Heizleistung der Öfen des Hauses.

2.1.3 Die Arbeitsleistung nach außen

Selbst wenn sich der Mensch in Ruhe befindet, verrichtet er Arbeit im physikalischen Sinne. Gemeint ist hier vor allem die Reibungsarbeit in den Blutgefäßen, die der menschliche Körper leisten muß, um den Blutkreislauf aufrecht zu erhalten. Diese Arbeit wird jedoch im Körperinneren in Wärme umgewandelt und erscheint als Teil der inneren Wärme in der Energiebilanz.

Sobald ein Mensch aber aktiv ist, wird ein Anteil der metabolischen Rate als Arbeit nach außen geleistet und steht dem Körper nicht mehr als Wärme zur Verfügung.

Zur Bewertung dieses Anteiles bietet sich hier, wie in den Ingenieurwissenschaften der Begriff des Wirkungsgrades der Arbeitsleistung an, der durch das Verhältnis der Arbeitsleistung nach außen ($-W$) zu der eingesetzten Leistung (M) definiert ist.

$$\eta = -W / M \quad (16).$$

Im Ruhestadium wird aufgrund der nur sehr geringen Arbeitsleistung ein Wirkungsgrad $\eta = 0$ angenommen.

Die Berechnung der nach außen geleisteten Arbeit stellt bei den menschlichen Aktivitäten ein sehr schwieriges Problem dar. Nach der physikalischen Definition berechnet sich die Arbeit A zu:

$$A = \int \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad (17),$$

wobei F die wirkende Kraft und s der Weg, entlang dem die Arbeit geleistet wird darstellen.

Viele Tätigkeiten des Menschen, wie z.B. das Heben von Lasten oder des eigenen Schwerpunktes auf ein höheres Niveau (z.B. Treppen- oder Bergsteigen) lassen sich energetisch noch relativ einfach aus (17) berechnen. Die meisten Aktivitäten setzen sich jedoch aus einer Vielzahl von Hebe-, Druck- und Reibungsarbeiten zusammen.

Die Arbeitsleistungen einer Schreibtätigkeit oder des Fußballspiels als Beispiele sind energetisch nicht exakt berechenbar. Man wird sich daher auf eine grobe Erfassung der geleisteten Arbeit beschränken müssen. Eine Rechtfertigung dafür liefert die Tatsache, daß der Wirkungsgrad der menschlichen Arbeit nur sehr gering ist und sich daher eine Unsicherheit in W nur unbedeutend auf die anderen Energieflüsse auswirkt. Nach Fanger (1972), Nishi (1981) und Gonzales (1981) übersteigt

der Wirkungsgrad der Arbeit eines Menschen nie einen Wert von 20%; Bei den meisten Aktivitäten liegt er sogar unter 10%. Die Tabelle 4 gibt die Wirkungsgrade für verschiedene Tätigkeiten nach Fanger (1972) an.

Tab.4: Der Wirkungsgrad η der nach außen geleisteten Arbeit bei verschiedenen Aktivitäten (nach Fanger, 1972).

Aktivität	Wirkungsgrad η
Ruhe	0,00
Gehen 5% Steig. 3,2 km/h	0,10
Gehen 15% Steig. 3,2 km/h	0,19
Gehen 25% Steig. 1,6 km/h	0,20
Hausarbeit	0,00-0,10
Sport	0,00-0,10

2.1.4 Die innere Wärme

Der Anteil der metabolischen Rate M , der nicht in Arbeit W umgewandelt wird, steht dem Körper als innere Wärme H zur Verfügung. Sie berechnet sich zu:

$$H = M + W = M - \eta \cdot M = M \cdot (1 - \eta) \quad (18).$$

Bei sehr großen körperlichen Anstrengungen führt der geringe Wirkungsgrad des menschlichen Körpers zu einer extrem hohen Zufuhr an innerer Wärme, deren sich der Körper entledigen muß. Man könnte daher den Körper eines Menschen mit einer Wärmekraftmaschine vergleichen, die den größten Anteil der eingesetzten Energie zur eigenen Beheizung und nicht zur Arbeitsleistung verbraucht.

2.2 Die Fühlbare Wärme

Der Fluß fühlbarer Wärme L beschreibt den turbulenten und molekularen Wärmeaustausch des menschlichen Körpers mit der Umgebung durch Konvektion und Konduktion. Er setzt sich aus den konvektiven Anteilen C_{Be} von den Bekleidungsoberflächen und C_{Un} von der unbedeckten Hautoberfläche und dem konduktiven Anteil C_{Ko} zusammen.

$$L = C_{Be} + C_{Un} + C_{Ko} \quad (19).$$

Gewöhnlich wird dem menschlichen Körper durch den Wärmefluß L Energie entzogen, in wenigen Situationen, in denen die Temperatur der Umgebungsluft oder der Kontaktflächen des Körpers über der jeweiligen Oberflächentemperatur des Menschen liegt, kann auch ein Energiegewinn durch Konvektion und Konduktion erfolgen.

In diesem Abschnitt sollen nur die Konvektion und Konduktion an der Körperoberfläche betrachtet werden; die Konvektionsprozesse im Atemtrakt werden in Abschnitt 2.6 diskutiert.

2.2.1 Die Konvektion

Unter Konvektion wird i.a. ein turbulenter Wärmeaustausch zwischen einer Oberfläche und einem gasförmigen oder flüssigen Medium verstanden. Mit der Konvektion sind immer Strömungen des Übertragungsmediums verbunden. Bei der Konvektion kann zwischen der "freien"- und der "erzwungenen" Konvektion unterschieden werden. Bei der freien Konvektion treten überwiegend Strömungen auf, die durch Temperatur- und dadurch Dichteunterschiede der Luft (des Wassers) hervorgerufen sind. Bei der erzwungenen Konvektion liegt eine Eigenströmung des Wärmeübertragungsmediums vor.

Zwischen den beiden Konvektionsarten gibt es einen Übergangsbereich, in dem sich beide Arten der Konvektion additiv verhalten. Die Quantität der übertragenen Energie durch Konvektion hängt bei der freien Konvektion hauptsächlich von der Temperaturdifferenz der Körperoberfläche und des umgebenden Mediums ab. Bei der erzwungenen Konvektion ist sie eine Funktion der Temperaturdifferenz und der Strömungsgeschwindigkeit des umgebenden Mediums.

Die Abgrenzung der verschiedenen Konvektionsarten wird von Fanger (1972) durch den Vergleich der folgenden Ausdrücke x und y (20) und

(21) durchgeführt, wobei x als Maß für die freie und y als Maß für die erzwungene Konvektion angenommen wird.

$$x = 2,05 (T_{cl} - T_a)^{0,25} \quad (20),$$

$$y = 10,4 v^{0,5} \quad (21).$$

In (20) und (21) sind T_{cl} die Temperatur der Kleidungsoberfläche ($^{\circ}\text{C}$), T_a die Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$) und v die Windgeschwindigkeit (m/s). Wenn $x > y$, dann liegt freie Konvektion vor, bei $x \leq y$ erzwungene Konvektion. Als grobe Abschätzung gibt Fanger (1972) an, daß bei Windgeschwindigkeiten über 0,1 m/s erzwungene Konvektion vorliegt. Nach Clark (1981) liegt diese Grenze bei 0,3 m/s, was zur Folge hätte, daß im Raumklima meistens nur freie Konvektion in Betracht käme. Er definiert freie Konvektion solange $\text{Gr}/\text{Re}^2 > 16$ ist. Bei $\text{Gr}/\text{Re}^2 < 0,1$ gibt es nach Clark (1981) nur noch erzwungene Konvektion. Bei diesen Definitionen sind Gr die Grashofzahl und Re die Reynoldszahl. Gr ist definiert zu:

$$\text{Gr} = \gamma \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta T \cdot \nu^{-2} \quad (22),$$

wobei γ der thermische Ausdehnungskoeffizient der Luft, g die Erdbeschleunigung, d eine charakteristische Länge des Körpers, ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Körperoberfläche und umgebendem Medium und ν dessen Viskosität ist.

Re ist definiert zu:

$$\text{Re} = v d / \nu \quad (23),$$

wobei v die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums ist. Aus (21) und (23) ergibt sich zur Abschätzung des Konvektionstyps:

$$\text{Gr} / \text{Re}^2 = g \cdot d \cdot \Delta T \cdot \nu^{-2} \quad (24).$$

Bei freier Konvektion, bei der Dichteunterschiede zwischen der körpernahen Luft und der Umgebungsluft maßgebend sind, sollte anstatt der Lufttemperatur T_a die virtuelle Temperatur T_v benutzt werden. Die virtuelle Temperatur T_v ist die Temperatur, die die Luft bei gleicher Dichte, jedoch ohne Wasserdampf hätte. Da Wasserdampf leichter als das mittlere Gewicht der anderen Luftbestandteile ist, liegt die

virtuelle Temperatur über der Lufttemperatur. Die virtuelle Temperatur T_v in °C wird berechnet zu:

$$T_v = T_a (1,00 + 0,38 e_1 / p) \quad (25).$$

In (25) steht e_1 für den Dampfdruck der Luft und p für den Luftdruck. Da aber e_1 an der Körperoberfläche verglichen mit dem der Umgebungsluft in den meisten Klimasituationen relativ hoch ist, kann nach Monteith (1978) das Außerachtlassen dieses Effektes bei einem unbedeckten Menschen zu einer Unterschätzung der freien Konvektion um bis zu 30% führen.

Im allgemeinen (z.B. Fanger, 1972) wird der konvektive Wärmefluß an der Oberfläche eines Menschen angesetzt zu:

$$C = A_{Du} f_{cl} h_c (T_a - T_o) \quad (26),$$

wobei A_{Du} die Oberfläche nach DuBois, f_{cl} der Vergrößerungsfaktor der Oberfläche durch die Kleidung, h_c die Wärmeübergangszahl sowie T_a und T_o die Lufttemperatur bzw. die Oberflächentemperatur der Kleidung oder der Haut (an unbedeckten Stellen) sind. Bei freier Konvektion sollte dabei, wie beschrieben, die Differenz der virtuellen Temperaturen angesetzt werden.

Die Wärmeübergangszahl h_c hängt in hohem Maße vom Konvektionstyp, nämlich erzwungen, frei oder gemischt, und vom Charakter des Austauschstromes, laminar oder turbulent, ab. Ansätze und Größenangaben für h_c sind in der Literatur für verschiedene Windgeschwindigkeitsbereiche und Körperhaltungen in großer Vielzahl angegeben. Sie werden in der Tabelle 5 und in den Abbildungen 5-9 aufgeführt und verglichen. Sie wurden durch theoretische Überlegungen für Normkörper wie Kugeln und Zylinder (z.B. Rapp, 1973), durch direkte Messung im Windkanal (Caroll et al., 1966), durch indirekte Berechnungsmethoden über die Energiebilanz des Körpers (z.B. Winslow et al., 1936) oder durch Analogiebetrachtungen des Austausches von Masse und Wärme über die Sublimationsrate von Naphtalkugeln am lebenden Menschen (Nishi, 1970) gefunden.

Die Abbildungen 5-9 zeigen zum Teil erhebliche Unterschiede bei der Wärmeübergangszahl h_c der verschiedenen Autoren. So liegen z.B. die Werte nach Fanger (1972) über denen der meisten anderen Autoren. Die Unterschiede betragen dabei bis zu ca. 50% des Mittelwertes der anderen Autoren, sodaß nach den Ansätzen von Fanger (1972) sicher eine Überschätzung des konvektiven Wärmeflusses vorliegt.

Offensichtlich unterschätzt wird die Wärmeübergangszahl in den Ansätzen nach Büttner (1934). Relativ gut passen sich die Werte nach Colin et al. (1967) den meisten anderen Autoren an. Sie haben außerdem den Vorteil eines im dargestellten Intervall nicht eingeschränkten Definitionsbereiches und weisen bei der Windgeschwindigkeit $v=0$ m/s einen von 0 verschiedenen Wert auf, was aufgrund der freien Konvektion notwendig und plausibel erscheint. Aus diesen Gründen werden in den folgenden Berechnungen die Ansätze nach Colin et al. (1967) Verwendung finden.

Tab.5: Ansätze für die Wärmeübergangszahl h_c in $W m^{-2}K^{-1}$ bei der Konvektion für verschiedene Körperhaltungen (v in m/s, T_{cl} und T_a in $^{\circ}C$)

Quelle	Ansatz h_c in $W m^{-2}K^{-1}$	Beschränkung
1. stehend		
Fanger, 1972	$h_c = 2,38 (T_{cl} - T_a)$ $h_c = 12,1 v^{0,5}$	jeweils der höhere Wert
Caroll et al., 1966	$h_c = 8,3 (p/1013) v^{0,6}$	erzwung. Konv.
Clark, 1981	$h_c = 6,7$	Raumklima
Colin et al., 1967	$h_c = 2,67 + 6,50 v^{0,67}$	keine
Kerslake, 1972	$h_c = 8,3 v^{0,5}$	
Mitchell et al. 1969	$h_c = 7,2 v^{0,6}$	
Monteith, 1974	$h_c = 7,6 v^{0,5}$	Außenklima
Nelson et al., 1947	$h_c = 4,8$ $h_c = 8,7 v^{0,5}$	Raumklima
Morgan, 1974	$h_c = 1,978 + 4,81 v^{0,67}$	$v \leq 0,5$ m/s
	$h_c = 5,642 v^{0,618}$	$0,5 < v \leq 2,0$ m/s
	$h_c = 5,014 v^{0,805}$	$2,0 < v \leq 4,0$ m/s
	$h_c = 5,627 v^{0,900}$	$4,0 < v$
2. sitzend		
Büttner, 1934	$h_c = 2,46$	freie Konvektion
Colin et al., 1967	$h_c = 2,26 + 7,42 v^{0,67}$	

Fortsetzung von Tabelle 5

Fanger, 1972	$h_c = 2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25}$	jeweils der hö-
	$h_c = 12,1 v^{0,5}$	here Wert gilt
Gagge et al., 1965	$h_c = 2,1$	sehr kleine v
Missenard, 1971	$h_c = 3,42 + 5,93 v$	Raumklima
Nishi, 1978	$h_c = 3,74 d^{-0,45} v^{0,55}$	
	d = Körperdurchmesser in m	
Winslow et al., 1936	$h_c = 11,6 v^{0,5}$	Raumklima
	$h_c = 3,48 + 18,56 v^{0,5}$	erzwung. Konv
Büttner, 1965	$h_c = 7,31 v^{0,5}$	erzwung. Konv.
3. liegend		
Colin et al., 1967	$h_c = 3,4$	
4. gehend v	= relative Windgeschwindigkeit	
Clark, 1981	$h_c = 30,3$	$v_r = 4,5 \text{ m/s}$
Nishi, 1978	$h_c = 8,6 v_r^{0,513}$	

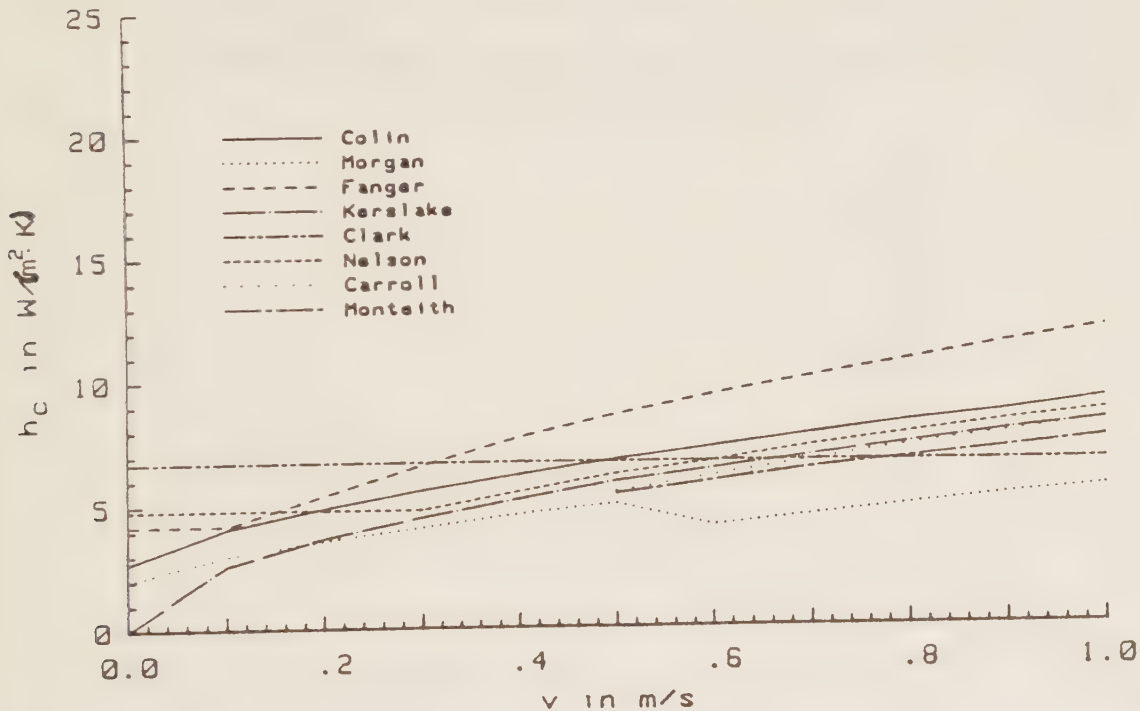


Abb.5 : Konvektive Wärmeübergangszahlen h_c verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v für einen **stehen-**
den Menschen bei kleinen Windgeschwindigkeiten.

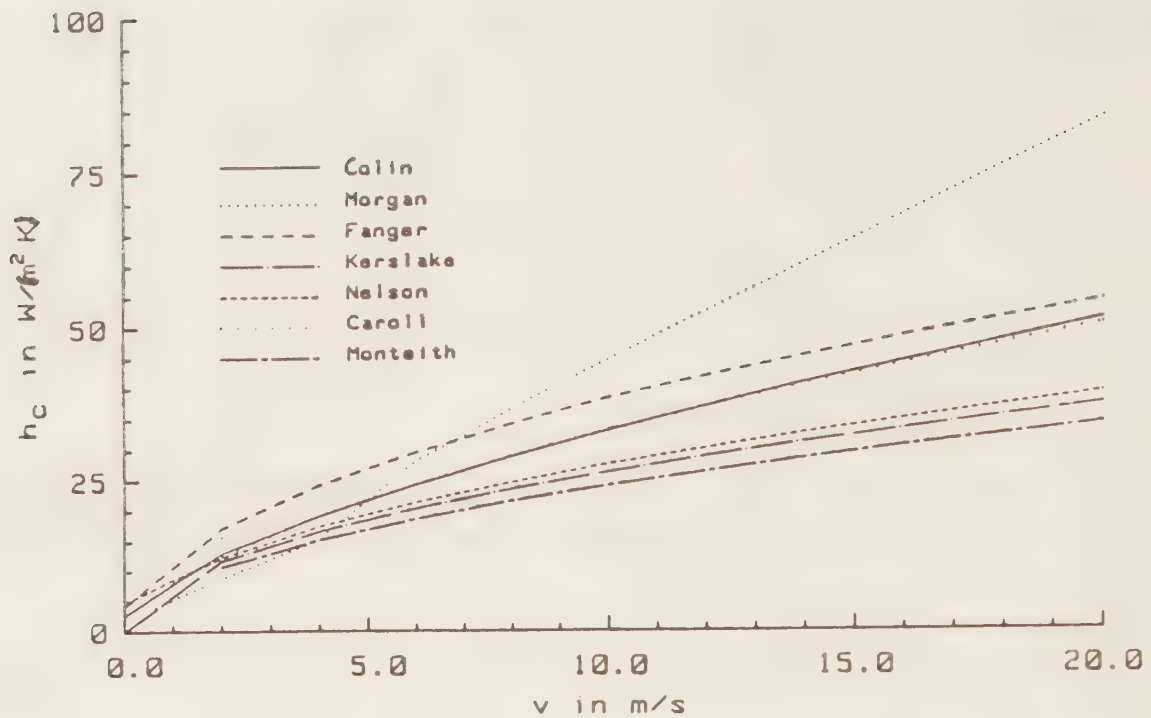


Abb.6 : Konvektive Wärmeübergangszahlen h_c verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v für einen **stehenden** Menschen bei höheren Windgeschwindigkeiten.

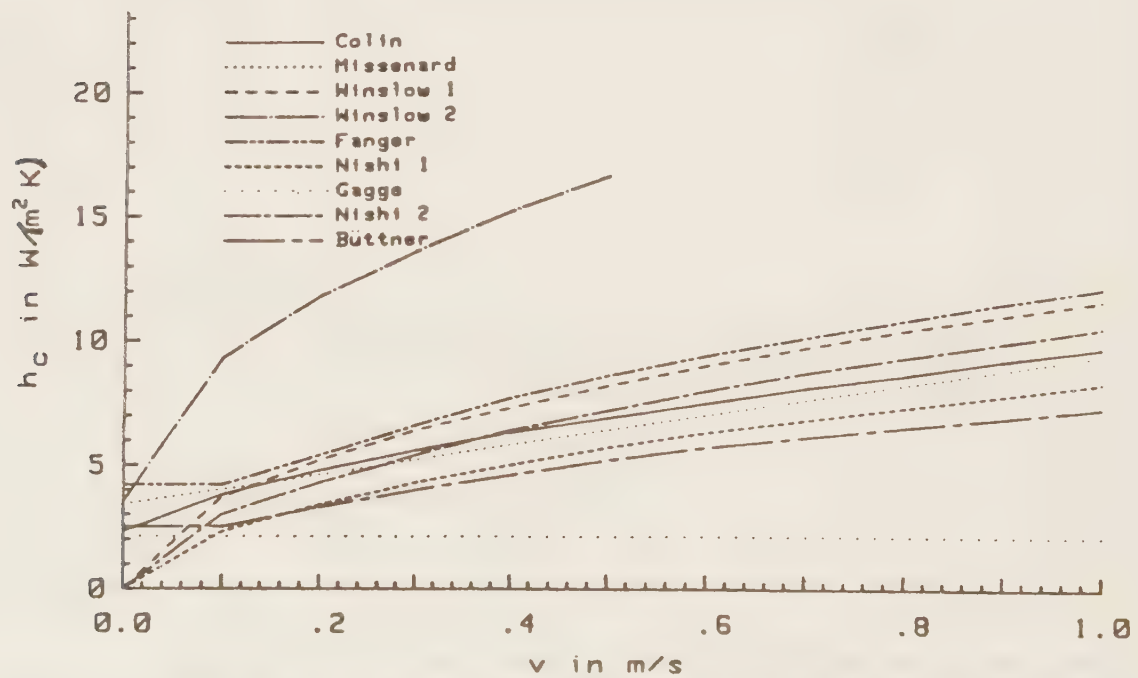


Abb.7 : Konvektive Wärmeübergangszahlen h_c verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v für einen **sitzenden** Menschen bei kleinen Windgeschwindigkeiten.

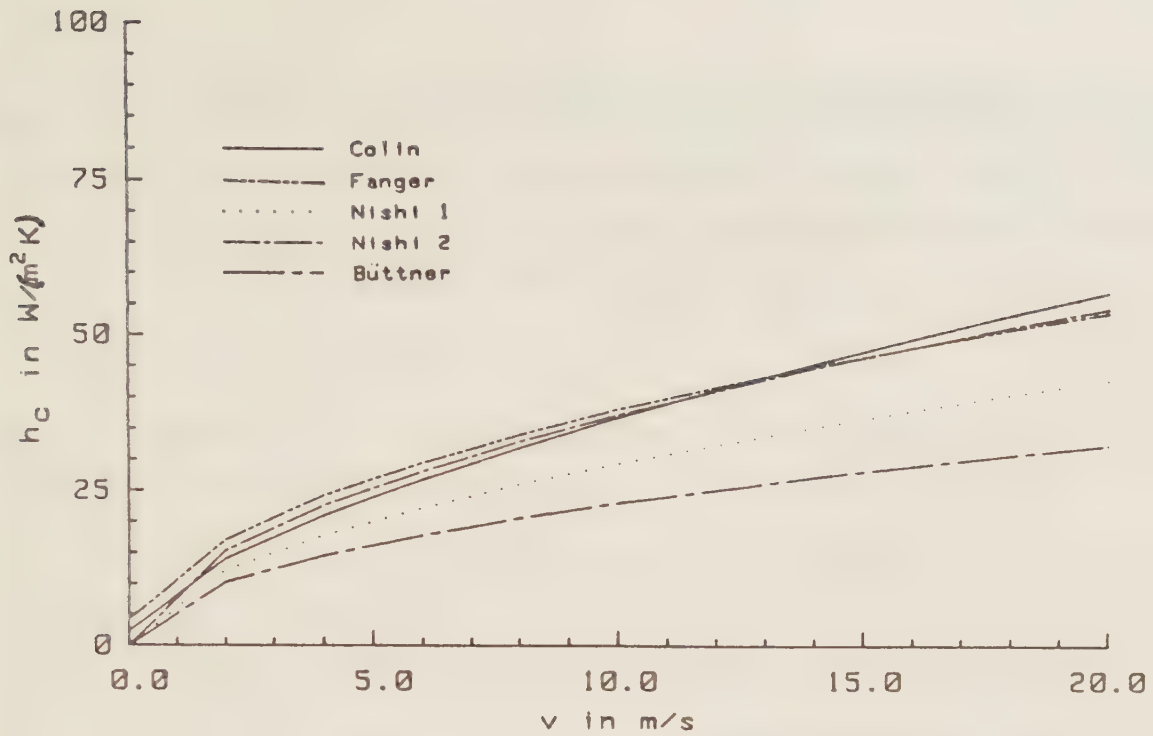


Abb.8 : Konvektive Wärmeübergangszahlen h_c verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v für einen **sitzenden** Menschen bei höheren Windgeschwindigkeiten.

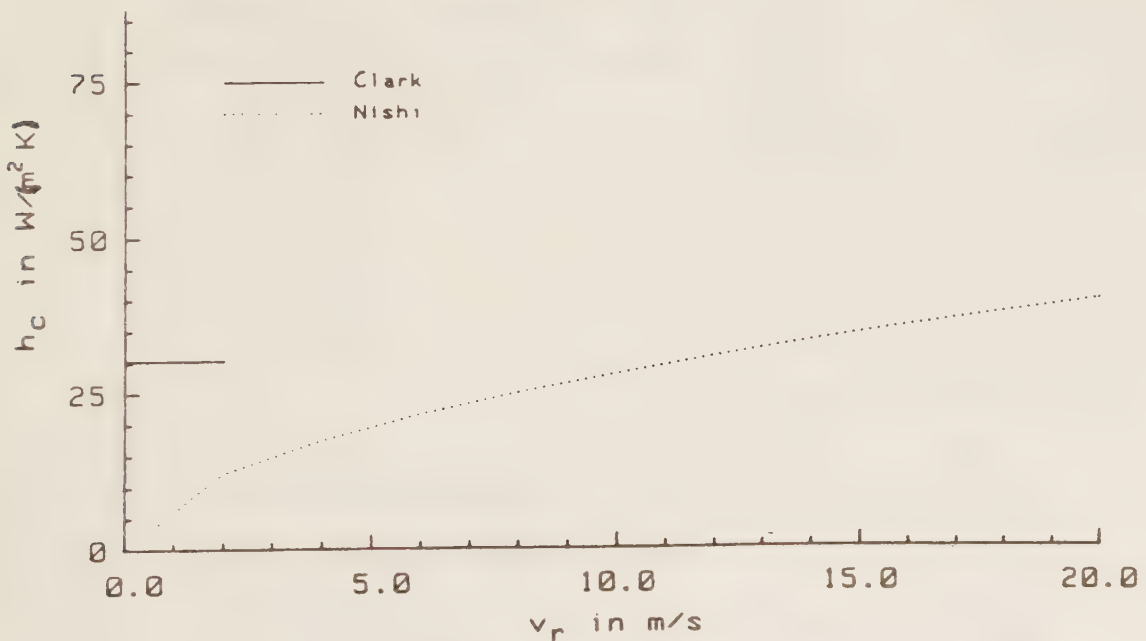


Abb.9 : Konvektive Wärmeübergangszahlen h_c verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit v_r für einen **gehenden** Menschen.

Die in den vorangegangenen Abbildungen (5-9) dargestellten Wärmeübergangszahlen h_c gelten im allgemeinen nur für einen Normluftdruck in Meeresniveau $p_0 = 1013,25$ mb. In anderen Höhen müssen daher Korrekturen angebracht werden. Nach Gonzales et al. (1974) kann die aktuelle Wärmeübergangszahl h_c als Funktion des Luftdruckes p in der Höhe z , wie in (26) angegeben, dargestellt werden:

$$h_c = h_c' (p / p_0)^{0,55} \quad (27),$$

wobei h_c' die Wärmeübergangszahl bei Meeresniveau ist.

Bei der Berechnung des Flusses fühlbarer Wärme durch Konvektion wird von den meisten Autoren die Vereinfachung gemacht, daß sie von einer einheitlich temperierten Körperoberfläche ausgehen. Fanger (1972) nimmt z.B. als Temperatur der wirksamen Körperoberfläche einheitlich die mittlere Kleidungsoberflächentemperatur an. Dabei werden unbedeckte Hautpartien, wie der Kopf, die Arme und Hände, die wesentlich höhere Oberflächentemperaturen als die Bekleidung haben, nicht berücksichtigt. Die Oberfläche des Kopfes kann bei Kleinkindern z.B. nach Clark (1981) bis zu 20% der gesamten Körperoberfläche erreichen. Bei Erwachsenen addieren sich die genannten unbedeckten Körperoberflächen zu ca. 15% der Gesamtoberfläche. In der Tabelle 6 sind die Oberflächenanteile einzelner Körperteile an der Gesamtoberfläche aufgelistet.

Tab.6 : Oberflächenanteile einzelner Körperteile an der Gesamtkörperoberfläche (nach Umbach, 1982)

Körperteil	Oberflächenanteil (%)
Kopf	7
Rumpf	34
Arme	21
Beine	38

Es ist daher zweckmäßig, (26) derart zu erweitern, daß der konvektive Wärmefluß getrennt als Fluß von der bekleideten und der unbekleideten Körperoberfläche berechnet wird. Dies geschieht, indem die gesamte Körperoberfläche A_{c1} aus (28) in einen bekleideten Anteil A_{Be} (30) und einen unbekleideten Anteil A_{Un} (31) aufgeteilt wird.

$$A_{c1} = A_{Du} \cdot f_{c1} = A_{Be} + A_{Un} \quad (28),$$

wobei f_{c1} ein nach Fanger (1972) durch die auftragende Wirkung der Kleidung hervorgerufener Vergrößerungsfaktor der Hautoberfläche ist. Der Faktor f_{c1} wird von Fanger (1972) als Funktion des Wärmedurchgangswiderstandes der Kleidung I_{c1} angegeben (siehe Tabelle 7). I_{c1} entspricht dabei nach Fanger (1972) dem mittleren Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung, bezogen auf die gesamte Körperoberfläche (vgl. Abschnitt 3.2).

Tab.7 : Vergrößerungsfaktor der Oberfläche f_{c1} in Abhängigkeit von Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung I_{c1} nach Fanger (1972).

I_{c1} in clo (1 clo = 0,155 W m ⁻² K ⁻¹)	f_{c1}
0,0 - 0,2	1,00
0,3 - 0,4	1,05
0,5 - 0,8	1,10
0,9 - 1,4	1,15
1,5 - 2,0	1,20 - 1,40
3,0 - 4,0	1,30 - 1,50

Um die Anteile der bekleideten (A_{Be}) und der unbekleideten Körperoberfläche (A_{Un}) berechnen zu können, wird hier ein Faktor z als Quotient aus der von Kleidung bedeckten Hautoberfläche und der gesamten Hautoberfläche (A_{Du}) definiert.

Der Faktor z läßt sich nach einer empirischen Beziehung wie für f_{c1} nach Morgan et al. (1974) als Funktion von I_{c1} , wie in Tabelle 8 angegeben, darstellen.

Tab.8 : Anteil der durch Kleidung bedeckten Hautoberfläche an der gesamten Hautoberfläche A_{Du} bei verschiedener Bekleidung.

Bekleidungsisolation I_{cl} in clo	Art der Kleidung	Anteil z
0,0	nackt	0,00
0,1	Turnhose	0,12
0,3	kurze Unterwäsche	0,38
0,6	leichte Sommerkleidung	0,74
1,0	Geschäftsanzug	0,88
2,0	feste Winterkleidung	0,96

Die in Tabelle 8 dargestellte Beziehung zwischen z und I_{cl} kann durch eine Regressionsgleichung 3. Grades in Form von (29) angenähert werden.

$$z = -2,36 + 173,51 I_{cl} - 100,76 I_{cl}^2 + 19,28 I_{cl}^3 \quad (29).$$

In (28) ist zu beachten, daß bei Werten von $I_{cl} \geq 2,4$ clo der Wert von z über 1 ansteigt, was natürlich unsinnig ist.

Die Kleidungsoberfläche A_{Be} berechnet sich damit zu:

$$A_{Be} = A_{Du} \cdot (f_{cl} - 1,00 + z) \quad (30),$$

und die unbedeckte Körperoberfläche A_{Un} zu:

$$A_{Un} = A_{Du} \cdot (1,00 - z) \quad (31).$$

Für den konvektiven Wärmefluß von der bekleideten Oberfläche C_{Be} folgt daher:

$$C_{Be} = A_{Be} \cdot h_c \cdot (T_a - T_{cl}) \quad (32),$$

und für die unbedeckte Oberfläche:

$$C_{Un} = A_{Un} \cdot h_c \cdot (T_a - T_{sk}) \quad (33).$$

Für den gesamten Körper ergibt sich danach ein konvektiver Wärmefluß von:

$$C = C_{Be} + C_{Un} \quad (34).$$

Nach Steadman (1979) können sich die Wärmeübergangszahlen h_c der bekleideten und der unbekleideten Oberflächen deutlich unterscheiden, da die Krümmungsradien der häufig unbekleideten Oberflächen wie Kopf, Hände, Arme oder Beine kleiner sind als die der gewöhnlich bekleideten Oberflächen wie der Rumpf.

In vielen Körperpositionen (z.B. Sitzen, Liegen) befindet sich ein Anteil der Körperoberfläche in direktem Kontakt mit einem Festkörper. An diesen Kontaktflächen kann kein turbulenter Wärmeaustausch durch Konvektion stattfinden. Deshalb muß die Oberfläche A_{c1} um die Kontaktfläche verringert werden. In der Regel ist diese Verringerung nur am bekleideten Anteil A_{Be} von A_{c1} anzusetzen. Der Wärmeübergang an der Kontaktfläche A_{Ko} wird im folgenden Abschnitt 2.2.2 berücksichtigt. Bei der erzwungenen Konvektion ist die Windgeschwindigkeit v der Umgebungsluft die meteorologische Steuergröße für den Wärmefluß. Sie wird in der Meteorologie im allgemeinen in einer Höhe von 6 oder 10m über dem Boden gemessen. Für den turbulenten Wärmeaustausch des Menschen müßte dagegen die integral von Kopf bis Fuß gemittelte Wingerschwindigkeit angesetzt werden. Die Verwendung der Windgeschwindigkeit in der Höhe des Schwerpunktes eines Menschen (ca. 1,2 m bei Erwachsenen) stellt jedoch wegen des großen Oberflächenanteiles des Rumpfes eine wesentliche Verbesserung dar. Für humanbiometeorologische Zwecke sollte sie deshalb auch in dieser Höhe bestimmt werden, oder über Windprofilansätze für die entsprechende Höhe berechnet werden.

2.2.2 Die Konduktion

Wenn ein Teil der Oberfläche eines Menschen in direktem Kontakt mit einem Festkörper wie z.B. der Sitzfläche eines Stuhles steht, so erfolgt von diesem Oberflächenanteil ein Wärmeaustausch durch Konduktion. Darunter wird hier im Gegensatz zum turbulenten Wärmeaustausch durch Konvektion der molekulare Wärmeaustausch verstanden.

Der Wärmeübergang durch Konduktion berechnet sich zu:

$$C_{Kd} = A_{Ko} \cdot h_k \cdot \Delta T \quad (35),$$

wobei h_k die konduktive Wärmeübergangszahl von der Körperoberfläche zum Festkörper, A_{Ko} die Kontaktfläche und ΔT die Temperaturdifferenz ist. In (35) kann A_{Ko} sowohl ein Teil von A_{Be} als auch von A_{Un} sein. Die Größenordnung von A_{Ko} ist nach eigenen Messungen, die durchgeführt wurden, da Angaben darüber in der Literatur nicht vorlagen, beim Sitzen ca. 6%, beim Liegen auf dem Rücken ca. 32% und beim Liegen auf der Seite ca. 19% der Oberfläche A_{Du} .

In den meisten Arbeiten wird der Wärmeverlust durch Konduktion aus zwei Gründen vernachlässigt.

1. Der Flächenanteil der Körperoberfläche mit festem Kontakt ist meistens sehr klein und in starkem Maße vom Körperbau und der Elastizität des Kontaktmaterials abhängig.
2. Die Wärmeleitfähigkeiten der als Sitz- oder Liegeflächen benutzten Materialien sind vergleichsweise gering.

Trotz dieser Argumente muß in einer ausführlichen Diskussion der Energiebilanz des Menschen auf den konduktiven Wärmefluß eingegangen werden.

In der Regel fließt der molekulare Wärmefluß durch mehrere Schichten, die sich aus verschiedenartigen Materialien zusammensetzen. Analog den Gesetzen der Reihenschaltung elektrischer Widerstände addieren sich auch hier die einzelnen Wärmeleitwiderstände R_i ($i=1,n$).

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (36).$$

Für den hier betrachteten Fall der Konduktion am menschlichen Körper bietet sich folgendes in Abbildung 10 dargestellte Schichtenmodell an. Nach Monteith (1978) beträgt der thermische Widerstand des peripheren Gewebes des Menschen R_{Ge} bei verengten Gefäßen (Vasokonstriktion)

$1,034 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$ und bei erweiterten Gefäßen (Vasodilatation) $0,259 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$. Bei Vasodilatation verringert sich der Widerstand auf ca. 25% des Widerstandes bei verengten Gefäßen, da durch die gesteigerte Durchblutung (Körperinterne Konvektion) ein größerer Wärmetransport ermöglicht wird.

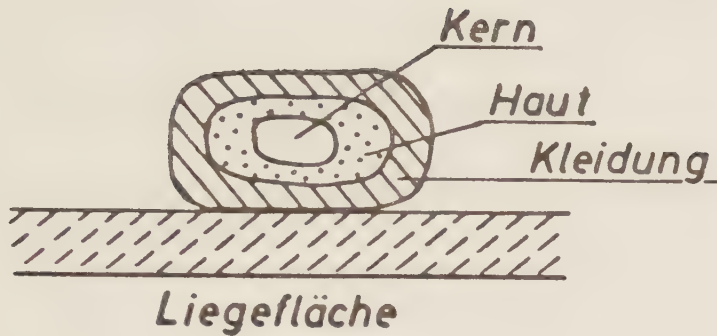


Abb.10: Schichtenmodell zum konduktiven Wärmefluß am menschlichen Körper (Beispiel für einen liegenden Menschen).

Für den thermischen Widerstand verschiedener Bekleidungsmaterialien R_{cl} liegen eine Vielzahl auf Messungen basierende Wertetabellen (z.B. Umbach 1982) vor. Der hier zu verwendende thermische Widerstand ist identisch mit dem in der Biometeorologie allgemein verwendeten sog. clo - Wert (von clothing). Eine detaillierte Beschreibung des thermischen Verhaltens der Bekleidung wird in Abschnitt 3.3 gegeben.

Der dritte zu berücksichtigende thermische Widerstand wird vom Material des Kontaktkörpers (R_{Ko}) dem Wärmefluß entgegengestellt.

Der Gesamtwiderstand R setzt sich folglich zusammen:

$$R = 1 / h_k = R_{Ge} + R_{cl} + R_{Ko} \quad (37).$$

Damit ergibt sich aus (35):

$$C_{Kd} = h_k (T_{Ko} - T_c) A_{Ko} \quad (38).$$

wobei T_{Ko} die Temperatur des Kontaktmaterials und T_c die Kerntemperatur (ca. 37°C) sind. Die Temperatur des Kontaktmaterials T_{Ko} wird in den meisten Fällen nahe bei der Lufttemperatur T_a liegen.

Eine große Schwierigkeit besteht in der Angabe des Widerstandes R_{Ko} des Kontaktmaterials. Die thermischen Eigenschaften verschiedener Materialien können aus physikalischen Tabellen meist nur in Form der Konduktivität entnommen werden, die sich durch die Dimension einer Länge vom reziproken Wärmedurchgangswiderstand unterscheidet. Diese Länge entspricht der Eindringtiefe der Temperaturänderung, die jedoch aus folgenden Gründen schwierig anzugeben ist. Der Hauptgrund dafür liegt in der Tatsache, daß bei der Konduktion meistens keine stationären Verhältnisse vorliegen, sondern es sich um einen zeitlich stark variablen Energiefluß handelt. So wird z.B. bei Beginn des Kontaktes mit einer Sitzfläche aufgrund des großen Temperaturunterschiedes ein großer Energiefluß einsetzen, der dann zu einem annähernden Temperatúrausgleich der Kontaktflächen führt. Bei genügend langem Kontakt kann sich die Temperaturwelle bis zur Unterseite der Sitzfläche fort-pflanzen. Von dort aus wird die Wärme dann wie an der freien Körperoberfläche durch Konvektion und Strahlung mit der Umgebung ausgetauscht.

Dann könnte man noch zur Vereinfachung anstatt des konduktiven Wärmeverlustes die konvektiven und aktinischen Energieflüsse von der nun in Wechselwirkung mit der Umgebung stehenden Oberfläche ansetzen, und den Wärmedurchgangswiderstand des Materials zu dem der Bekleidung addieren. In diesem Fall wird die Sitzfläche oder die Liegefläche als Teil der Bekleidung angesehen.

Eine Voraussetzung für diese Annahme ist natürlich die Vernachlässigung horizontaler Wärmeflüsse im Kontaktmaterial.

Würde man diese berücksichtigen, so würde dies zu einer Vergrößerung der tätigen Oberfläche führen. So würde z.B. aus der Kontaktfläche beim Liegen als tätige Oberfläche die gesamte Unterseite der Matratze.

Alle angegebenen Betrachtungen müssen in einer ausführlichen und grundlegenden Diskussion des Flusses fühlbarer Wärme vom menschlichen Körper angestellt werden, können jedoch bei den meisten praktischen Anwendungen vernachlässigt werden.

So ergaben z.B. Abschätzungen der Größenordnung des konduktiven Wärmeflusses C_{Kd} beim Sitzen auf Naturstein mit einer Temperatur von 20°C bei optimaler Durchblutung ca. 8 W und auf einer gleichtemperierten Holzunterlage ca. 4 W

Der konduktive Wärmefluß durch die häufigste Kontaktfläche des Menschen, nämlich die Schuhsohlen, kann wegen des sehr großen Wärmeleitwiderstandes des Sohlenmaterials vernachlässigt werden.

2.2.3 Die Berechnung des Flusses fühlbarer Wärme

Zusammenfassend soll hier noch einmal das Rechenverfahren zur Berechnung des Flusses fühlbarer Wärme, L wie in (19) angesetzt, erläutert werden, bei dem in folgender Reihenfolge verfahren werden kann:

1. Feststellen der Körperposition des zu betrachtenden Individuums.
2. Erfassung der Bekleidung und Berechnung der bekleideten Körperoberfläche A_{Be} .
3. Berechnung der unbekleideten Hautoberfläche A_{Un} .
4. Erfassung der Oberflächenanteile mit direktem Kontakt zu Festkörpern A_{Ko} .
5. Messung oder Berechnung der Haut- und Kleidungstemperaturen
6. Wahl der für die vorgegebene Situation geeigneten Wärmeübergangszahlen.
7. Getrennte Berechnung des Flusses fühlbarer Wärme von dem bekleideten, dem unbekleideten und dem in direktem Kontakt mit festen Materialien stehenden Oberflächenanteil.
8. Addition der in 7. berechneten Wärmeflüsse.

2.3 Die Wasserdampfdiffusion

Die Wasserdampfdiffusion ist ein Teil der sogenannten Perspiratio Insensibilis, die nicht von der Thermoregulation kontrolliert wird. Das Wasser diffundiert gasförmig durch die äußeren Hautschichten und die Bekleidung. Der Mensch nimmt diesen Wasserverlust des Körpers nicht wahr, da mit ihm keine Benetzung der Haut oder der Kleidung und keine merkliche Abkühlung der Hautoberfläche verbunden ist.

Die Verdunstungsenergie, die zur Umwandlung des Wassers in den dann diffundierenden Wasserdampf benötigt wird, entstammt den tieferen Gewebeschichten der Haut, die keine Thermorezeptoren besitzen.

Bei energetischen Betrachtungen, wie in dieser Arbeit, müßte man korrekterweise nicht die Wasserdampfdiffusion an sich, die keine Energie benötigt, sondern die Verdunstung des Wassers in Wasserdampf, der dann diffundieren kann, betrachten. Die dazu erforderliche Leistung kann aus (39), wie von Fanger (1972) angegeben, berechnet werden.

$$E_D = r \cdot m \cdot A_{Du} \cdot (E(T_{sk}) - e_l) \quad (39),$$

wobei r die Verdunstungswärme von Wasser, m der Wasserdampfdurchlässigkeitskoeffizient, A_{Du} die Körperoberfläche nach DuBois (1916), $E(T_{sk})$ der Sättigungsdampfdruck bei der mittleren Hauttemperatur und e_l der Dampfdruck der Umgebungsluft sind.

E_D ist danach von einem Durchlässigkeitskoeffizienten für Wasserdampf, von der Größe der Körperoberfläche und vom Dampfdruckgefälle zwischen der Hautoberfläche und der Umgebungsluft abhängig.

Der Durchlässigkeitskoeffizient für Wasserdampf m setzt sich aus einem Koeffizienten für die Haut und einem für die Kleidung analog der Reihenschaltung von Widerständen in der Elektrizitätslehre zusammen, wobei die Widerstände den reziproken Durchlässigkeitskoeffizienten entsprechen. Nach Büttner (1965) stellt dabei die Hornschicht der Epidermis den größten Widerstand dar.

Der Durchlässigkeitskoeffizient der Haut für Wasserdampf beträgt nach Untersuchungen von Inoue (1953) $1,27 \cdot 10^{-7} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ mb}^{-1}$.

Multipliziert man den Durchlässigkeitskoeffizienten mit der Verdun-

stungswärme des Wassers, so ergibt sich als Maßzahl für die Wasserdampfdiffusion:

$$m \cdot r = 0,311 \text{ W m}^{-2} \text{ mb}^{-1}$$

Der reziproke Wert von $m \cdot r$ entspricht dem Widerstand R_D wie er häufig in der Bekleidungsphysiologie für verschiedene Bekleidungsmaterialien angegeben wird. R_D beträgt hier für die Haut $3,215 \text{ m}^2 \text{ mb W}^{-1}$. Für einen typischen zweiteiligen Büroanzug ergaben Messungen am Modell, wie auch bei Trageversuchen am Menschen nach Umbach (1982), Werte für den Durchgangswiderstand R_D von $0,225 \text{ m}^2 \text{ mb W}^{-1}$. Die Widerstände zur Wasserdampfdiffusion von Haut und typischer Bekleidung unterscheiden sich danach um einen Faktor größer als 10. Daher ist die Vernachlässigung des Diffusionswiderstandes der Kleidung bei der großen Unsicherheit des Widerstandes der menschlichen Haut in vielen Fällen vertretbar.

Weitere Beispiele für Diffusionswiderstände von Bekleidung sind in der Tabelle 9 nach Messungen von Umbach (1982) angegeben. Sie zeigt, daß letztere Annahme nicht allgemein gültig ist. Bei eng anliegenden gummierten Bekleidungsmaterialien, wie z.B. bei einem Neoprenanzug von Wassersportlern, ist diese Annahme nicht berechtigt. Dabei wird die Wasserdampfdiffusion durch den nahezu unendlich großen Diffusionswiderstand der Bekleidung an den bedeckten Körperoberflächen zum Erliegen kommen. Auf den Diffusionswiderstand von Oberbettmaterialien wird in einem späteren Abschnitt eingegangen werden.

Tab.9: Wasserdampfdiffusionswiderstand R_D verschiedenartiger Bekleidungsarten nach Mecheels et al. (1976) beim Gehen.

Bekleidungsart	R_D (in $\text{m}^2 \text{ mb W}^{-1}$)
1. Anzug mit gut feuchtedurchlässigem Material	0,097
2. Anzug wie 1, jedoch 1,5-fache Schichtdicke	0,114
3. Anzug mit geringer Feuchtedurchlässigkeit; Dicke wie 1	0,114
4. Regenschutzanzug	0,659

Einen großen und teilweise auch entscheidenden Einfluß auf den Diffusionswiderstand üben viele individuelle Größen und Verhaltensweisen aus. So bewirkt z.B. das Eincremen oder Einölen der Haut beim Sonnenbaden nach Precht et al. (1955) eine wesentliche Erhöhung des Diffusionswiderstandes. Der Betrag dieser Erhöhung, die bisher quantitativ nur unzulänglich untersucht wurde, hängt von der Konsistenz des angewandten Mittels und dessen Schichtdicke ab.

Diesem Gedankengang folgend ist sicher auch die individuell sehr unterschiedliche körpereigene Nachfettung der Haut eine Einflußgröße, Nach Fanger (1972) spielt auch das Alter eines Individuums eine wichtige Rolle, da bei älteren Menschen durch Alterungsprozesse der Haut, wie z.B. durch Verhornung der äußersten Hautschicht, ein größerer Diffusionswiderstand zu erwarten ist. Über die Größenordnung dieses Einflusses gibt es in der Literatur keine befriedigenden Angaben. Nach Paeschke (1973), der sich in seiner Argumentation auch auf Veröffentlichungen von Aschoff (1971), Hardy (1961) und Thauer (1955) stützt, hängt E_D nicht in der aufgeführten linearen Relation vom Wasserdampfdruck der Umgebungsluft ab. Ein Grund dafür ist eine Abhängigkeit des Diffusionswiderstandes, der bei trockenen Umgebungsbedingungen größer ist als bei feuchten. Einem größeren Dampfdruckgradienten steht demnach ein größerer Diffusionswiderstand entgegen. Auf diese Weise entstünde ein Kompensationseffekt, der die Wasserdampfdiffusion weniger variabel gestalten würde.

Bei der Betrachtung dieses Phänomens müssen die physiologischen Effekte der relativen Luftfeuchtigkeit und die der absoluten Luftfeuchtigkeit differenziert betrachtet werden. Die relative Luftfeuchtigkeit ist der maßgebliche Faktor für das Quellen und Verkrusten der oberen Hautschichten und damit die Steuergröße für den Diffusionswiderstand. Der Dampfdruck der Umgebungsluft dagegen steht über den Dampfdruckgradienten in linearer Relation zur Diffusion. Da die Größen Dampfdruck und relative Luftfeuchtigkeit keinen linearen Zusammenhang aufweisen, muß die Kompensationstheorie nach Paeschke (1973) mit Vorsicht betrachtet werden.

Aufgrund des unterschiedlichen Aufbaues des Unterhautgewebes von Mann und Frau sind auch geschlechtsspezifische Unterschiede für die Wasserdampfdiffusion zu erwarten.

Alle bisher angedeuteten Einflußgrößen auf die Diffusion sind bis heute nicht befriedigend quantifiziert. Deshalb wird im folgenden für den Diffusionswiderstand der Wert nach Inoue (1953) $R_D = 3,215 \text{ m}^2 \text{ mb W}^{-1}$ verwendet.

Eine bis heute nur selten beachtete Einflußgröße auf die Wasserdampfdiffusion stellt die Schweißbildung dar. An vollständig benetzten Hautpartien kann keine Diffusion mehr aus der Unterhaut durch die Oberhaut in die Umgebungsluft stattfinden, da dann zwischen den beiden Hautschichten kein Dampfdruckgefälle mehr besteht. An diesen Körperpartien tritt dann als latenter Wärmefluß nur noch die Schweißverdunstung auf, der ein spezielles Kapitel (2.4) gewidmet ist. Daher liegt es nahe, bei der Berechnung der Wasserdampfdiffusion eine Größe b , den sogenannten Benetzungsgrad einzuführen. Diese Größe b gibt das Verhältnis von benetzter zur gesamten Hautoberfläche an. Die Quantifizierung von b wird im Abschnitt 2.4.3 erläutert.

$$b = \text{benetzte Hautoberfläche} / A_{Du} \quad (40).$$

Der Benetzungsgrad b , der dem Wasserbedeckungsfaktor in Verdunstungsformeln wie der nach Albrecht (1930) entspricht, kann Werte von 0 bei völlig unbenetzter Haut bis zu 1 bei Benetzung der gesamten Hautoberfläche annehmen.

Da die Wasserdampfdiffusion nur an den unbenetzten Anteilen der Haut auftreten kann, muß die in (39) angesetzte Oberfläche A_{Du} den herrschenden Verhältnissen angepasst werden. Die für die Diffusion wirksame Oberfläche A_{Diff} ergibt sich zu:

$$A_{Diff} = A_{Du} (1 - b) \quad (41),$$

und der latente Wärmefluß E_D zu:

$$E_D = r_m A_{Du} (1 - b) (E(T_{sk}) - e_1) \quad (42).$$

Ein weiteres Problem stellt die Quantifizierung des Sättigungsdampfdruckes $E(T_{sk})$ dar. Nach Böll (1978) liegt der Wasserdampfdiffusion eine Verdunstung von Gewebeflüssigkeit zugrunde. Der Sättigungsdampfdruck über der Gewebeflüssigkeit, die kein reines Wasser sondern eine Lösung ist, liegt niedriger als bei reinem Wasser. Die Lösungskonzentration beträgt ca. 0,9%, was einer Erniedrigung des Sättigungsdampfdruckes von ca. 0,3% entspricht. Diese Erniedrigung kann, vergleicht man sie mit dem Fehler bei der Temperatur der Lösung oder beim Diffusionswiderstand, vernachlässigt werden.

In der Literatur (z.B. Fanger, 1972) wird die Oberflächentemperatur der Haut als die der Gewebeflüssigkeit in der Unterhaut angesetzt. Dies ist sicher nicht exakt richtig, da das Wasser in den tieferen Hautschichten verdunstet. Die Temperatur dort wird zwischen der Hautoberflächentemperatur und der Kerntemperatur liegen und je nach Außenklimabedingungen sich mehr oder weniger von der Hautoberflächentemperatur unterscheiden. Die Quantifizierung der entsprechenden Verdunstungstemperatur ist jedoch mit den in der Literatur angegebenen Untersuchungen fast unmöglich. Deshalb wird in den folgenden Berechnungen des latenten Wärmeflusses E_D von einer Verdunstungstemperatur in Höhe der Hauttemperatur ausgegangen.

2.4 Die Schweißverdunstung

Der Mensch besitzt nach Böll (1978) als einziges Lebewesen auf annähernd der gesamten Hautoberfläche Schweißdrüsen. Ihre Anzahl beträgt ca. 2 Millionen und ihre durchschnittliche Dichte liegt bei $125/\text{cm}^2$. Die größte Schweißdrüsendichte ist auf den Händen und Füßen lokalisiert. Nach Böll (1978) produziert der Mensch unter normalen Bedingungen ca 800ml Schweiß pro Tag, in tropischen Klimagebieten können 3-4 l pro Tag und bei extremen Belastungen (z.B. Bergbau) bis zu 10 l pro Tag erreicht werden.

Falls der gesamte produzierte Schweiß verdunstet (kein Abtropfen), wird dadurch dem Menschen eine mittlere Verdunstungsleistung von ca. 22-279 W entzogen. Nach Wenzel et al. (1980) liegen die maximalen stündlichen Schweißraten bei 4 l/h, was einem latenten Wärmefluß von 2678 W entsprechen würde. Nach Vogt et al. (1981) liegen die maximalen stündlichen Schweißraten dagegen nur bei 0,7 l/h bei nicht hitzeakklimatisierten Personen und bei 2,5 l/h bei akklimatisierten Personen. Der von McArdle et al. (1947) entwickelte P4SR (Predicted 4 Hour Sweat Rate) Index, der auf vierstündigen Messungen der Schweißraten von U-Boot Besatzungen beruht, gibt Grenzwerte der Zumutbarkeit von 3 l, entsprechend 0,75 l/h an. Monteith (1978) berichtet von maximalen Werten der Schweißproduktion von 1 l/h.

Bei großer Hitzebelastung und dadurch bedingter hoher Schweißproduktion kann jedoch nicht von der gesamten Verdunstung des ausgeschiedenen Schweißes ausgegangen werden, da ein Teil des Schweißes in flüssiger Form vom Körper abtropft.

2.4.1 Die Physiologie des Schwitzens

Die Schweißraten von Männern und Frauen unterscheiden sich nach Wyndham et al. (1965) selbst bei Normierung auf die Körpermasse oder die Körperoberfläche signifikant. Messungen von Wyndham et al. (1965) ergaben bei einem Hitzebelastungsversuch in der ersten Stunde der Belastung eine mittlere Schweißrate der Männer von 333 ml/m^2 und der Frauen von 186 ml/m^2 . Die Untersuchungen von Wyndham et al. sind sehr bedeutend, da an den meisten vergleichbaren Untersuchungen

immer nur Männer als Probanden zur Verfügung standen. Während der experimentellen Untersuchungen war $T_a=34^{\circ}\text{C}$, $T_f=32^{\circ}\text{C}$, $v=0,4\text{ m/s}$; Die Aktivität dabei wird als "Treppensteigen" (12 Stufen/Minute) angegeben.

Eine Erklärung für das geschlechtsspezifisch unterschiedliche Verhalten könnten nach Fox (1974) die unterschiedlichen hormonellen Steuerungsmechanismen sein, da die Unterschiede erst nach der Pubertät auftreten. Eine weitere Ursache kann in der bei Frauen geringeren Anzahl der Schweißdrüsen gesehen werden.

Neben den individuellen Unterschieden der Schweißraten können große Unterschiede zwischen hitzeakklimatisierten und nicht akklimatisierten Personen bestehen. Nach Wenzel und Piekarski (1980) kann durch Hitzeakklimatisation eine Steigerung der Schweißrate um bis zu 100% erreicht werden. Steigerungen um 30% wurden durch Messungen bestätigt. Deshalb ist das jährliche Maximum nach Ogawa et al. (1979) aufgrund der Hitzegewöhnung im Sommer zu erwarten.

Neben den physiologischen Steuergrößen üben auch die Aktivität, die Bekleidung sowie die thermischen und auch hygrischen Parameter der Umgebung einen Einfluß auf die Schweißrate aus. Sie können jedoch über ihre Steuerfunktion der Hauttemperatur und der Kerntemperatur berücksichtigt werden. So werden sich z.B. hohe metabolische Raten, hohe Lufttemperaturen und hohe Luftfeuchtigkeiten über eine Erhöhung der Körpertemperaturen steigernd auf die Schweißrate auswirken.

Dabei muß man sich aber bewußt sein, daß ein von Davis (1974) beschriebener Effekt unberücksichtigt bleibt. Dieser Effekt liegt darin, daß bei hoher Aktivität das Schwitzen schneller einsetzt als bei Ruhe, selbst wenn dabei die Hauttemperatur und die Kerntemperatur dieselben sind.

Große Schweißraten über einen längeren Zeitraum (mehrere Stunden) hinweg führen zu einer sogenannten Hydromeiosis, einem Aufquellen der Poren, und einer dadurch verursachten Behinderung des Austrittes von Schweiß (nach Sargent, 1962). Die Hydromeiosis führt zu einem erheblichen Absinken der Schweißrate. Sie dürfte auch die Ursache für den von Azer et al. (1977) eingeführten Schweißunterdrückungsfaktor sein. Danach führt eine Benetzung von über 40% der Hautoberfläche zu einer Hemmung der Schweißproduktion. Auch ein Versagen im zentralen Nervensystem kann nach Collins et al. (1962) eine Verminderung der Schweißrate zur Folge haben.

Die Trinkmenge hat nach Wenzel et al. (1980) keinen Einfluß auf die Schweißrate, sofern dem Körper Wasser in ausreichender Menge zur Verfügung steht.

Grundsätzlich muß das Schwitzen und die Fähigkeit, viel Schweiß produzieren zu können, im thermophysiologischen Sinne als sehr positiv angesehen werden. Diese Meinung widerspricht jedoch der vor allem durch die Werbung aufgebauten Wertung, daß Schwitzen "unhygienisch" und "unästhetisch" sei, mit dem Ziel, schweißhemmende Produkte zu verkaufen.

Neben dem Schwitzen aus thermoregulatorischen Gründen gibt es nach Böll (1978) noch 3 weitere Arten des Schwitzens, die hier nur kurz erwähnt werden sollen. Dazu gehört das emotionelle Schwitzen, das nervös gesteuert ist und rein von psychischen Faktoren (z.B. Angst) abhängt. Nach Sugenoya et al. (1982) tritt diese Art des Schwitzens bevorzugt auf den Hand- und Fußflächen und in der Achselhöhle auf. Vor allem auf den Hand- und Fußflächen kann dagegen kein thermoregulatorischer Schweiß registriert werden.

Das sogenannte gustatorische Schwitzen wird durch einen Reflex auf bestimmte Gewürze während der Nahrungsaufnahme ausgelöst. Es tritt nur am Kopf und nur bei dafür sensibilisierten Personen auf. Zur dritten Gruppe der nicht thermisch bedingten Schweißarten sind alle krankhaften Schweißausbrüche zu rechnen, deren Ursachen oft nicht erklärbar sind. Die drei angeführten Transpirationsarten können bei den energetischen Berechnungen nicht berücksichtigt werden, da es sich hier um individuell sehr spezielle Formen handelt. Dennoch können sie im Einzelfall erheblichen Einfluß auf die Energetik eines Menschen haben. Im weiteren wird nur das thermoregulatorische Schwitzen betrachtet, dessen Funktion der Ausgleich der menschlichen Energiebilanz in thermisch belastenden Situationen ist.

Für die Energetik des Schwitzen, d.h. den latenten Wärmefluß durch Verdunstung von Schweiß, sind zwei auf den ersten Blick unabhängige Größen bestimmend. Zum einen ist dies der Wärmefluß durch Verdunstung des gesamten Schweißes ($r \cdot SW$) und zum anderen die physikalisch maximal mögliche Schweißverdunstung (E_{pot}) von der Körperoberfläche. Diese Größen sind nicht gänzlich unabhängig, da eine verminderte Verdunstungsmöglichkeit (z.B. hohe Luftfeuchte) sich in einem Ansteigen der Körpertemperaturen und damit in einer Steigerung der Schweißrate auswirkt.

2.4.2 Die physiologische Schweißrate

Die Menge des produzierten Schweißes SW hängt in erster Linie von der Höhe der Körpertemperaturen ab. Unter dem Begriff "Körpertemperaturen" sind die Hauttemperatur T_{sk} und die Kerntemperatur T_c zu verstehen. In der Literatur wird SW in unterschiedlichen Ansätzen als Funktion der mittleren Hauttemperatur, der Kerntemperatur oder eines gewichteten Mittels aus beiden angegeben. Als Kerntemperatur wird zwischen der Rektaltemperatur, der Temperatur in der Speiseröhre und der Trommelfelltemperatur differenziert, die sich vor allem durch verschiedene Reaktionszeiten auf thermische Veränderungen unterscheiden. Die Temperatur des Trommelfelles wird oft als Maß für den thermischen Zustand des Körperinneren genommen, da das Trommelfell neben dem wichtigsten thermischen Steuerzentrum des Menschen, dem Hypothalamus, liegt (Bligh et al., 1974; Tromp, 1974).

Benzinger (1961) setzt die Schweißrate nur als Funktion der Temperatur des Hypothalamus an, was er durch experimentelle Untersuchungen mit Warmbädern bestätigt fand. Nach Hardy et al. (1966) gilt diese Aussage jedoch nur bei hohen mittleren Hauttemperaturen, die bei Benzingers Untersuchungen wohl auch vorlagen. Bei niedrigen Hauttemperaturen $T_{sk} \leq 35^\circ\text{C}$ ist nach Hardy et al. (1966) kein Einfluß der Kerntemperatur auf die Schweißrate zu erwarten. Bei sehr niedrigen Kerntemperaturen wiederum hat die Hauttemperatur keinen Einfluß auf SW . Die Schweißrate steigt aber mit wachsendem T_c bis ca. $37,8^\circ\text{C}$ an. Die Tatsache, daß die Kerntemperatur nicht allein die Schweißproduktion steuert, wurde auch in Versuchen mit konstanter Kerntemperatur und Abkühlung einzelner Hautpartien bestätigt.

Nach Saltin et al. (1971) gibt es drei verschiedene Modellvorstellungen der Schweißregulation. Die Faktoren a und b sind in den Modellen jeweils unterschiedliche individuelle Konstanten.

1. Die Schweißproduktion wird nur von der Kerntemperatur T_c gesteuert. Ein Ansatz für diese Modellvorstellung hat folgende Form:

$$SW = a (T_c - T_c') \quad (43),$$

wobei T_c' die Auslösetemperatur der Schweißproduktion ist, die auch als Funktion der Lufttemperatur angesetzt werden kann. Wenn $T_c \leq T_c'$ wird definitionsgemäß kein Schweiß ausgeschieden.

Dieses von Benzinger favorisierte Modell wird von Kerslake (1972) unter Hinweis auf widersprüchliche Experimente kritisiert. Auch Banjeree et al. (1969) stellten durch Erwärmen oder Abkühlen bestimmter Hautpartien einen äußeren Einfluß auf die Schweißbildung fest.

2. Es gibt zwei Auslösepunkte für die Schweißproduktion, die durch die Haut- und die Kerntemperatur gesteuert sind. (Gagge et al., 1969; Azer et al., 1977)

$$SW = a \cdot (T_c - T_c') + b \cdot (T_{sk} - T_{sk}') \quad (44).$$

In (44) werden negative Werte zu Null gesetzt, was einen Einfluß der unter dem entsprechenden Auslösepunkt liegenden Körpertemperatur auf die Schweißrate ausschließt, was jedoch nicht der Realität entspricht.

Neben diesem Modell setzen Hardy et al. (1966) ein Schweißmodell mit einer multiplikativen Kontrolle der Schweißrate durch Haut- und Kerntemperatur in der folgenden Form an:

$$SW = a \cdot (T_c - T_c') \cdot (T_{sk} - T_{sk}') \quad (45).$$

Dieses Modell, in dem, sobald negative Faktoren auftreten, SW zu Null gesetzt wird, hat aber den Nachteil, daß dadurch, wenn die Haut- oder die Kerntemperatur unter die jeweilige Auslösetemperatur fällt, kein Schweiß mehr gebildet wird. Durch experimentelle Untersuchungen (Gagge et al., 1969) wurde aber gezeigt, daß selbst bei niedrigen Kerntemperaturen (unter der Auslösetemperatur) noch Schweiß gebildet wurde, wenn nur die Hauttemperatur genügend hoch lag.

3. Die Schweißproduktion wird von einer mittleren Körpertemperatur T_B gesteuert (Gagge et al., 1969; Saltin et al., 1971; Snellen, 1969); T_B' ist die entsprechende Auslösetemperatur.

$$SW = a \cdot (T_B - T_B') \quad (46),$$

wobei T_B sich als gewichtetes Mittel aus der mittleren Hauttemperatur und der Kerntemperatur errechnet. Als Wichtungsverhältnis von Kern- zu Hauttemperatur wird von Gagge (1969) 9:1 und von Saltin et al. (1971) 8:2 angegeben.

Berücksichtigt man die aus experimentellen Untersuchungen gefundenen Ergebnisse, so ist das Modell 3 mit der gewichteten mittleren Körpertemperatur den anderen Modellen überlegen und soll daher hier im weiteren Verwendung finden. Diesem Ansatz widersprechen auch nicht die Ergebnisse von Stolwijk et al. (1966), der eine Abhängigkeit der Schweißrate von der Hauttemperatur, ohne Berücksichtigung der Kerntemperatur fand, wie in der Abbildung 11 qualitativ dargestellt.

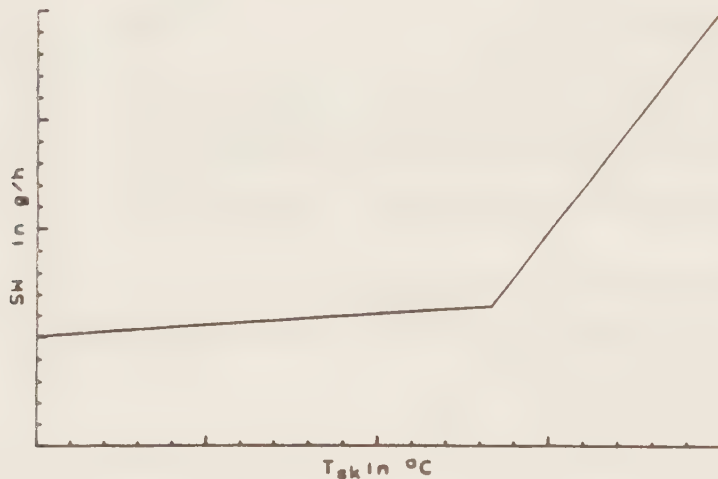


Abb.11: Qualitative Darstellung der Schweißrate SW eines Menschen in Abhängigkeit von dessen mittlerer Hauttemperatur T_{sk} (nach Stolwijk et al., 1966)

Der steile Anstieg der Schweißrate bei einer bestimmten Hauttemperatur ist durch einen damit verbundenen Anstieg der Kerntemperatur zu erklären. Die Hauttemperatur steigt aufgrund der jetzt nassen Oberfläche nur noch langsam an, während sich die thermische Belastung immer mehr auf den Körperkern auswirkt. Daher widerspricht die in Abbildung 11 dargestellte Kurve nicht der durch (46) berechneten Schweißrate SW.

Auch Benzingers (1961) Tauchbadversuche stehen nicht im direkten Widerspruch zu (46), da bei den Badeversuchen relativ schnell eine thermische Anpassung von Badewasser- und Hauttemperatur erfolgt. Daher erscheint die Aussage, daß SW bei den untersuchten Bedingungen nur von der Kerntemperatur abhängt gerechtfertigt. Jedoch wird der Einfluß der Hauttemperatur dadurch nicht ausgeschlossen.

Die Bestimmung des Koeffizienten a und der Auslösetemperatur T_B' in (46) steht auf etwas unsicheren Beinen, da in der Literatur nur wenige

Veröffentlichungen von experimentell bestimmten Schweißraten und den dazugehörigen T_{sk} und T_c vorliegen. Ein weiterer Grund dafür liegt in den unterschiedlichen Meßverfahren der Schweißrate, die, wenn sie an der Hautoberfläche durchgeführt werden (elektrische Methoden, Manschetten zur Sammlung des Schweißes, hygroskopische Stoffe), die Bedingungen an der Oberfläche erheblich verändern (Ito et al., 1978). Bei Meßverfahren, die den Massenverlust des Körpers erfassen, muß der insensible Massenverlust durch Wasserdampfdiffusion, durch die Atmung und durch den Stoffwechsel berücksichtigt werden.

Dies ist aber bei vielen Veröffentlichungen (z.B. Stolwijk et al., 1966; Saltin et al., 1971) wegen fehlender Angaben nicht möglich.

Als Ansätze für die physiologische Schweißrate SW ergeben sich durch Regressionsrechnung aus den dafür sehr geeigneten Meßwerten von Hardy (1978):

$$a. \quad T_B = 0,1 \cdot T_{sk} + 0,9 \cdot T_c \quad (47),$$

$$SW = 8,47 \cdot 10^{-5} \cdot (T_B - 36,6) A_{Du} \quad (\text{in kg/s}) \quad (48),$$

$$b. \quad T_B = 0,2 \cdot T_{sk} + 0,8 \cdot T_c \quad (49),$$

$$SW = 6,92 \cdot 10^{-5} \cdot (T_B - 35,8) A_{Du} \quad (\text{in kg/s}) \quad (50).$$

Beide Ansätze a und b passen sich mit annähernd der gleichen Güte den Meßwerten an. Da jedoch Gonzales et al. (1978) eine eher dem Ansatz a entsprechende Auslösetemperatur von $36,4^{\circ}\text{C}$ angeben, wird im weiteren dieser Ansatz (48) Verwendung finden. An (48) sind noch Korrekturen für das Geschlecht und die Körperhaltung anzubringen. Eine andere denkbare Veränderung des Ansatzes läge in der Einführung einer mit einem Tagesgang versehenen Auslösetemperatur.

Die Körperhaltung übt nach Ogawa et al. (1980) einen Einfluß auf die lokale Schweißbildung aus. So beginnt z.B. die Schweißbildung bei aufrecht stehender oder sitzender Position an fast allen Körperpartien gleichzeitig. In liegender Position beginnt die Schweißbildung zuerst auf der aufliegenden Fläche und setzt mit Verzögerung auf der anderen Oberfläche ein. Dieser sog. Druck-Schweiß-Reflex kann nicht mit einer unterschiedlichen Hauttemperatur erklärt werden. Vergleicht man die lokalen Schweißraten am menschlichen Körper, so findet man nach Ogawa

et al. (1980) eine Abnahme der Schweißproduktion von der Brust zu den Oberschenkeln und zu den Armen und Waden hin.

Kleinflächige hohe Schweißraten treten dagegen am Kopf, auf den Hand- und Fußflächen und in der Achselbeuge auf. Die genannten Phänomene sind jedoch individuell so unterschiedlich ausgeprägt, daß eine mathematische Formulierung hier nicht sinnvoll erscheint.

Eine andere Sachlage stellt sich bei den geschlechtsspezifischen Unterschieden der Schweißrate dar. Nach Wyndham et al. (1965) ergab sich bei experimentellen Untersuchungen ein signifikanter Unterschied der auf die jeweilige Körperoberfläche normierten Schweißraten von Männern und Frauen. Die Schweißrate von Frauen betrug, über einen Versuchszeitraum von 3 Stunden gemittelt, für unakklimatisierte Probanden 69% und für akklimatisierte Probanden 66% der Schweißrate der Männer. Diese Werte gelten jedoch nur für große thermische Belastungen. Sie dürften bei kleineren Belastungen etwas höher sein.

Aus Mangel eines besseren Ansatzes, aber eingedenk der Notwendigkeit einer Differenzierung, wird in allen folgenden Berechnungen die auf die Körperoberfläche normierte Schweißrate von Frauen zu 70% der von Männern angesetzt. Da in (48) nur Meßdaten von männlichen Probanden zugrunde liegen, ergibt sich für die Schweißrate SWF von weiblichen Personen:

$$SWF = 0,7 \cdot SW \quad (51).$$

Auch die Auslösetemperatur T_B' könnte bei Frauen andere Werte als bei Männern haben. Diese Annahme kann aber mangels entsprechender Untersuchungen weder bestätigt noch widerlegt werden. Untersuchungen von Fox (1974) zeigen, daß Frauen im allgemeinen tiefere mittlere Hauttemperaturen aufweisen. Diese Unterschiede könnten sich auch in unterschiedlichen T_B' äußern. Die weiteren Schlüsse, daß dadurch bei Frauen die Schweißproduktion verzögert wird, oder eine tiefere Auslösetemperatur vorliegt, sind nicht zu belegen.

Die Schweißrate SW ist eine rein physiologische Größe. Sie ist nicht zwingend ein Maß für den Energieentzug des Körpers durch Schweißverdunstung. Der latente Wärmefluß durch Schweißverdunstung hängt ebenso von den Umgebungsbedingungen und als Kenngröße dieser von der sog. potentiellen Verdunstung am menschlichen Körper ab. Da die potentielle Verdunstung als die unter den vorgegebenen Bedingungen bei optimaler Wasserversorgung maximal mögliche Verdunstung definiert ist, limitiert sie den Wärmefluß durch die Schweißverdunstung E_{SW} . Wenn die

Schweißrate SW unter der potentiell verdunstenden Schweißmenge liegt, kann der gesamte produzierte Schweiß verdunsten und der dadurch vom Körper fließende Wärmestrom E_{phys} berechnet sich zu:

$$E_{phys} = SW \cdot r \quad (52),$$

wobei r die Verdunstungswärme von Wasser ist.

Liegt jedoch die Schweißrate SW über der potentiell verdunstenden Wassermenge SW_{pot} , so tropft ein Teil des Schweißes vom Körper ab, ohne ihm Energie entzogen zu haben. In diesem Fall ist die potentielle Verdunstung E_{pot} das Maß für den Energiefluß durch Transpiration.

Eine Voraussetzung für diese Aussage ist die gleichmäßige Benetzung des Körpers. Nach Sibbons (1966) und Kerslake (1963) tropft jedoch aufgrund von ungleichmäßiger Schweißbildung schon Schweiß ab, bevor die gesamte Körperoberfläche benetzt ist. Nach Kerslake (1955) tropft bereits Schweiß ab, sobald der Quotient aus Schweißrate und potentiell verdunstender Wassermenge b einen Wert von 0,45, nach Vogt et al. (1981) von 0,70, annimmt.

$$b = SW / SW_{pot} \quad (53).$$

Der Quotient b wird auch als Benetzungsgrad der Haut bezeichnet, was sicher wegen der ungleichmäßigen Schweißproduktion nicht exakt richtig ist. Burt et al. (1982) geben den Benetzungsgrad als empirische Funktion der mittleren Hauttemperatur an. Da b auch für die Wasserdampfdiffusion bedeutend ist, sind diese Werte in der Tabelle 10 angegeben.

Tab.10: Benetzungsgrad der Haut b in Abhängigkeit von der mittleren Hauttemperatur T_{sk} (Burt et al., 1982).

mittlere Hauttemp.	Benetzungsgrad b
$T_{sk} \leq 33^{\circ}\text{C}$	$b = 0,0$
$33^{\circ}\text{C} < T_{sk} \leq 37^{\circ}\text{C}$	$b = (T_{sk} - 33,0) / 16,0$
$T_{sk} > 37^{\circ}\text{C}$	$b = 1,0$

Die in der Tabelle 10 angegebenen Ansätze gelten sicher nicht allgemein, da die Kerntemperatur unberücksichtigt geblieben ist.

2.4.3 Die Energetik der potentiellen Schweißverdunstung

Die potentielle Schweißverdunstung von der Körperoberfläche, die der Verdunstung bei einem Benetzungsgrad b von 1,0 entspricht, wird im allgemeinen (z.B. Gonzales et al., 1978) als Funktion eines latenten Wärmeübergangskoeffizienten h_e und der Differenz der Dampfdrucke an der Hautoberfläche und in der Umgebungsluft angegeben (54).

$$E_{\text{pot}} = h_e (E(T_{\text{sk}}) - e_1) A_{\text{Du}} \quad (54).$$

Für den Sättigungsdampfdruck an der Hautoberfläche kann ohne großen Fehler der Sättigungsdampfdruck von Wasser bei der Temperatur T_{sk} angesetzt werden. Nach Böll (1978) beträgt die Salzkonzentration von Schweiß ca. 0,2% - 0,3%, was zu einer Dampfdruckerniedrigung um ca. 0,1% führt. Dieser Fehler ist verglichen mit dem Fehler von T_{sk} , zu vernachlässigen.

Zur Berechnung von E_{pot} - bei unbekanntem h_e aber bekannten h_c und T_{sk} - ist die energetische Verdunstungsformel nach Hofmann (1955) sehr geeignet. Sie lautet für einen Menschen:

$$E_{\text{pot}} = -0,623 h_c r / (p c_p) (E(T_{\text{sk}}) - e_1) A_{\text{Du}} \quad (55).$$

Die in (54) eingeführte latente Wärmeübergangszahl h_e entspricht demnach:

$$h_e = -0,623 h_c r / (p c_p) \quad (56).$$

Bei einem Luftdruck von $p = 1013,3$ mb nimmt nach (56) h_e den 1,47 - fachen Betrag von h_c an. Dieser Faktor liegt in der Größenordnung des von Gonzales et al. (1978) experimentell gefundenen $h_e = 1,65 \text{ K mb}^{-1}$. Der Grund für diesen etwas höheren Wert mag in einem niedrigeren Luftdruck zum Zeitpunkt der Messungen liegen.

Die vorangehenden Gleichungen für E_{pot} gelten in dieser Form nur für den unbedeckten Menschen, da die Wärmeübergangszahl h_c den Austausch

an der äußersten Körperoberfläche beschreibt. Beim bekleideten Menschen sind die Austauschbedingungen an der von Kleidung bedeckten Hautoberfläche, an der der Schweiß verdunstet, wesentlich ungünstiger. Nur im Falle sehr starker thermischer Belastung und ungünstiger Austauschbedingungen wird die Kleidungsoberfläche durch den Schweiß benetzt.

Ansätze für die latente Wärmeübergangszahl h_e für die von Kleidung bedeckte Hautoberfläche wurden z.B. von Gagge (1981) und Burt et al. (1982) aufgestellt. In ihnen ist h_e als Funktion des Wärmeübergangskoeffizienten h_c an der Bekleidungsoberfläche und des Wärmedurchgangswiderstandes R_{cl} dargestellt.

Diese Ansätze können nur grobe Näherungen sein und gelten nur für unbeschichtete Kleidungsmaterialien. Bei wasserundurchlässiger Kleidung können trotz sehr geringer R_{cl} - Werte sehr hohe Widerstände gegen den Austausch von Wasserdampf auftreten. Im Ansatz nach Gagge (1981) berechnet sich h_e zu:

$$h_e = 1,65 \cdot h_c \cdot F_{ec} \quad (57),$$

wobei F_{ec} ein Durchlässigkeitskoeffizient der Kleidung für Wasserdampf ist. F_{ec} wird von Gagge angesetzt zu:

$$F_{ec} = 1 / (1 + 0,92 h_c \cdot R_{cl}) \quad (58).$$

(57) und (58) sind Zahlenwertgleichungen, wobei sich in (57) h_e in $W m^{-2} mb^{-1}$ ergibt, wenn h_c in $W m^{-2} K^{-1}$ eingesetzt wird. F_{ec} ist eine dimensionslose Größe und berechnet sich aus (58) durch Einsetzen von h_c in $W m^{-2} K^{-1}$ und von R_{cl} in $K W^{-1} m^{-2}$.

Für eine Bekleidung mit $R_{cl} = 0,155 K W^{-1} m^{-2}$ ($= 1 clo$) und einer konvektiven Wärmeübergangszahl $h_c = 9,2 W m^{-2} K^{-1}$ (für $v=1,0 m/s$) ergibt sich z.B. aus (57) $h_e = 6,6 W m^{-2} mb^{-1}$.

Die potentielle Schweißverdunstung setzt sich aus der potentiellen Verdunstung von den unbekleideten und den bekleideten Körperoberflächen zusammen. Die potentielle Schweißverdunstung der unbekleideten Hautoberfläche ergibt sich zu:

$$E_{potU} = A_{Du} \cdot (1 - z) 0,623 h_c / (p \cdot c_p) (E(T_{sk}) - e_1) \quad (59),$$

und die potentielle Verdunstung von der bekleideten Hautoberfläche:

$$E_{\text{potB}} = A_{\text{Du}} \cdot z \cdot F_{\text{ec}} \cdot 0,623 \cdot h_c / (p \cdot c_p) (E(T_{\text{sk}}) - e_1)$$

Die gesamte potentielle Schweißverdunstung ergibt sich dann zu:

$$E_{\text{pot}} = E_{\text{potU}} + E_{\text{potB}} \quad (61).$$

Da Gagge (1981) jedoch F_{ec} als Mittelwert über den gesamten Körper (bekleidet und unbekleidet) angibt, muß bei der Verwendung von F_{ec} aus (58) die Gleichung für die potentielle Schweißverdunstung lauten:

$$E_{\text{pot}} = A_{\text{Du}} \cdot F_{\text{ec}} \cdot 0,623 \cdot h_c / (p \cdot c_p) (E(T_{\text{sk}}) - e_1)$$

Die Wärmeübergangszahlen h_c in (59) und (60) müssen nicht denselben Wert haben, da die bekleideten Körperpartien (Rumpf, Beine) wegen geringerer Krümmungen in der Regel kleinere Wärmeübergangszahlen als die unbekleideten Körperpartien (Finger, Kopf, Hals) haben. Diese Differenzierung wird jedoch hier nicht durchgeführt.

Auch $E(T_{\text{sk}})$ kann sich durch unterschiedliche Hauttemperaturen von bekleideten und unbekleideten Oberflächen, vor allem in kalter Umgebung, unterscheiden.

2.4.4 Der Energieverlust des Körpers durch Schweißverdunstung

Der latente Wärmefluß, der dem Körper durch Schweißverdunstung Energie entzieht, kann nach folgendem Schema berechnet werden.

Nach der Berechnung der potentiellen Schweißverdunstung E_{pot} (62) und der physiologisch möglichen E_{phys} (52) erfolgt der Vergleich der beiden Werte. Da beide Größen limitierend sind, entspricht der jeweils kleinere Wert dem gesuchten Energieverlust durch Schweißverdunstung. Dabei muß man sich bewußt sein, daß die potentielle Verdunstung wegen des Abtropfeffektes erst erreicht wird, wenn die Schweißrate schon größer als die potentiell verdunstende Schweißmenge ist. Daher kann der latente Wärmestrom E_{Sw} in vielen Fällen, wie z.B. bei feuchtwarmen Umgebungsbedingungen und ungünstigen Austauschverhältnissen, durch das Modell überschätzt werden.

Da jedoch in der Literatur, wie schon erwähnt, sehr unsichere und unterschiedliche Bewertungen des abtropfenden Anteils der Schweißrate vorliegen, kann dieses Phänomen noch nicht formelmäßig berücksichtigt werden.

Mit dieser Problematik hängt auch die physiologische Bewertung der Effektivität des Schwitzens zusammen. Diese, dem mechanischen Wirkungsgrad ähnliche Größe I_e ist definiert (nach Givoni et al., 1962) als:

$$I_e = E_{Sw} / E_{phys} \quad (63).$$

Die Effektivität des Schwitzens erlangt große Bedeutung, wenn die Wasserversorgung des Körpers erschwert ist. Sie steht nur in indirekter Beziehung zum Benetzungsgrad b der Haut.

Der Benetzungsgrad b wird beim bekleideten Menschen gedämpft und zeitlich verschoben. Durch Absorption der Kleidung von Schweiß wird die Schweißverdunstung verzögert. Sie hält auch noch nach Beendigung der Schweißproduktion an, bis die Kleidung abgetrocknet ist. Dieses Phänomen kann nach Wenzel et al. (1980) zur Unterkühlung führen, da nach Beendigung einer schweißtreibenden Aktivität die metabolische Rate rasch sinkt, der latente Wärme fluß durch Schweißverdunstung jedoch anhält. Hinzu kommt eine geringere Wärmeisolation von durchnässter Kleidung. Auch Stolwijk et al. (1966) weisen auf eine Verzögerung der Schweißverdunstung gegenüber Änderungen der Steuergrößen hin.

Durch die Schweißsekretion als thermophysiologische Steuergröße unterscheidet sich der Mensch von den anderen homoiothermen Lebewesen, die jedoch nicht minder effiziente Techniken entwickelt haben, um sich eines Überangebots an Wärme zu entsorgen. So ist z.B. bei Hunden das Hecheln ein probates Mittel, durch Verdunstungskühlung der Zunge und der oberen Atemwege Energie abzugeben. Darin liegt sogar ein Vorteil gegenüber der Schweißverdunstung, weil hiermit kein Salzverlust des Körpers verbunden ist, und durch die gleichbleibend hohen Haut- bzw. Felltemperaturen die Konvektion und Ausstrahlung nicht wie beim Menschen reduziert sind.

2.5 Der Strahlungssaldo des menschlichen Körpers

Der Strahlungssaldo des Menschen gehört in vielen klimatischen Situationen zu den bedeutendsten Termen der Energiebilanz. Meistens ist der Strahlungssaldo negativ und entzieht dem Körper Energie. Nur an sonnigen Tagen im Freiland und bei Strahlungsheizung in geschlossenen Räumen können positive Werte angenommen werden.

Der Strahlungssaldo Q' setzt sich aus folgenden Strahlungsflüssen zusammen:

$$Q' = K + E + A' + r' + D + I \quad (64).$$

In (64) steht K für die Strahlungsemission der Körperoberfläche, E für den langwelligen Strahlungsfluß von den festen Oberflächen der Umgebung, I für die direkte Sonnenstrahlung, r' für die von den Umgebungsoberflächen reflektierte solare Strahlung, D' für die diffuse Himmelstrahlung und A' für die atmosphärische Gegenstrahlung. Beim Strahlungssaldo des Menschen sind nur die jeweils absorbierten Anteile der einzelnen Strahlungsflüsse zu berücksichtigen. Sie hängen vom Absorptionsvermögen der jeweiligen Oberflächen, vom Winkel zur Einstrahlungsrichtung und von der effektiven Strahlungsoberfläche des Menschen ab. Ein Berechnungsverfahren des menschlichen Strahlungssaldos für solare Strahlung wird von Lauscher (1973) am Modell eines Zylinders erläutert.

In geschlossenen Räumen, mit nicht zu großer Einstrahlung durch die Fenster, können die atmosphärischen Strahlungsflüsse I , D , r' und A' energetisch gesehen vernachlässigt werden. Deshalb gilt für Innenräume:

$$Q' = K + E \quad (65).$$

Bedeutende Parameter für den Strahlungssaldo des Menschen sind die Absorptions- und Emissionskoeffizienten im langwelligen sowie die Albedo von Haut und Kleidung im kurzwelligen Bereich.

Der Emissionskoeffizient von menschlicher Haut ϵ_{sk} für langwellige Strahlung (ca. $3\mu\text{m} - 100\mu\text{m}$) liegt nach Hardy et al. (1934) und Mitchell (1970) nahe bei 1,0. Für die Bekleidung gibt Fanger (1972) einen mittleren Absorptionskoeffizienten ϵ_{cl} von 0,95 an, wobei die Unterschiede verschiedener Kleidungsmaterialien sehr gering sind.

Bei den Berechnungen der Strahlungsflüsse am Menschen werden in dieser Arbeit im weiteren für die langwelligen Absorptionskoeffizienten der Haut $\epsilon_{sk} = 0,99$ und der Bekleidung $\epsilon_{cl} = 0,95$ angesetzt.

Erwartungsgemäß unterschiedlicher sind die Absorptionskoeffizienten $\alpha_{\lambda r}$ für den Spektralbereich von $0,3\mu m - 3,0\mu m$, die von der Haut- und Kleidungsfarbe und der Beschaffenheit des Bekleidungsmaterials stark abhängen. So wurden bei eigenen exemplarischen Messungen Absorptionskoeffizienten α_{cl} verschiedener Bekleidungsstücke von 0,39 bis 0,93 gefunden (Tab.11). Ähnliche Werte werden auch von Rees et al. (1946) angegeben die Absorptionskoeffizienten α_{cl} verschiedenfarbiger Kleidungsstücke im Bereich zwischen 0,39 und 0,80 fanden.

Unterschiedliche Absorptionskoeffizienten beeinflussen in starkem Maße den Strahlungssaldo und damit die Energiebilanz eines Menschen, was an einem späteren Beispiel veranschaulicht werden soll.

Tab.11: Absorptionskoeffizienten α_{cl} verschiedener Bekleidungsstücke für solare Strahlung.

Art der Bekleidung	Absorptionskoeffizient α_{cl}
Leintuch, weiß	0,39
Schlafsack, gelb	0,43
Decke, rot-weiß	0,48
Rock, rot	0,64
Kleid, dunkel	0,70
Futterstoff, dunkel	0,71
Verdunklungsstoff, schwarz	0,93

Die Absorptionskoeffizienten der menschlichen Haut für solare Strahlung α_{sk} unterscheiden sich je nach Hautfarbe und Rasse. Die Unterschiede sind jedoch nach Gates (1980) nicht sehr groß. Sie liegen am Handrücken von Weißen zwischen 0,645 und 0,728 und von Dunkelhäutigen zwischen 0,752 und 0,793. Die Mittelwerte (0,687 und 0,773) unterscheiden sich um 0,086 d.h. um ca. 9%. Diese relativ geringen Unterschiede werden auch von Büttner (1965) bestätigt, der einen kurzwelligen Absorptionskoeffizienten α_{sk} für Weiße von 0,6 und für Schwarze von 0,7 angibt.

Neben den Absorptionskoeffizienten hat die Größe der für den Strahlungsaustausch mit der Umgebung effektiven Oberfläche A_{eff} des Menschen einen bedeutenden Einfluß auf den Strahlungssaldo. Da die Oberfläche des Menschen keine Ebene ist, und Teile dieser Oberfläche in gegenseitigem Strahlungsaustausch stehen (z.B. die Innenseiten der Oberschenkel), ist die effektive Strahlungsoberfläche A_{eff} nur ein Teil der Gesamtoberfläche A_{cl} . Sie berechnet sich zu:

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{Du}} \cdot f_{\text{cl}} \cdot f_{\text{eff}} \quad (66),$$

wobei A_{Du} die Oberfläche des unbedeckten Körpers nach DuBois (1915) f_{cl} den Vergrößerungsfaktor der Oberfläche durch die Kleidung und f_{eff} den Faktor, der je nach Körperhaltung den effektiven Anteil der Strahlungsoberfläche an der Gesamtoberfläche darstellt.

Nach den Untersuchungen von Fanger (1972) kann ein mittleres f_{eff} für stehende Personen von 0,73 und für sitzende Personen von 0,70 angenommen werden. Für einen liegenden Menschen müßte demnach f_{eff} kleiner als 0,5 sein.

Die kleineren effektiven Ausstrahlungsoberflächen bei sitzenden und liegenden Personen sind durch den direkten Kontakt von Körperteilen mit festen Oberflächen wie der Sitzfläche eines Stuhles oder der Matratze des Bettes zu erklären.

Die effektive Ausstrahlungsoberfläche A_{eff} ist natürlich gleichfalls die effektive Oberfläche zur Absorption von zum Körper gerichteten Strahlungsflüssen aus der gesamten Umgebung (voller Raumwinkel). Dies gilt für ungerichtete diffuse Strahlungsflüsse, wie sie z.B. in einem geschlossenen Raum anzutreffen sind.

Bei gerichteten Strahlungsflüssen von punktförmigen Strahlungsquellen, wie z.B. der direkten Sonnenstrahlung, ist die aktuelle Oberfläche des sich im Strahlungsweg befindlichen Körpers mit einem Projektionsfaktor zu korrigieren, der die aktuelle Oberfläche auf die effektiv wirksame Oberfläche senkrecht zur Einstrahlungsrichtung projiziert. Dieser Projektionsfaktor f_p hängt von der Körperhaltung, von der Sonnenhöhe h und dem Azimutwinkel α ab, wobei sich eine Bestrahlung von hinten oder von vorne beim stehenden Menschen energetisch kaum unterscheidet.

Im folgenden werden daher immer nur die zwei extremen Beispiele der Bestrahlung, von vorne und hinten, oder von der Seite betrachtet. Da nach Fanger (1972) die Unterschiede im Projektionsfaktors f_p für Mann und Frau vernachlässigbar sind (ebenso zwischen unbedeckt und

bekleidet), gibt die folgende Tabelle 12 mittlere f_p - Faktoren, die nur noch vom Sonnenwinkel h abhängen, an. Die Definition von f_p lautet:

$$f_p = A_p / A_{eff} \quad (67),$$

wobei A_p die Projektionsfläche des Körpers senkrecht zur Einstrahlungsrichtung und A_{eff} die effektive Ausstrahlungsoberfläche sind.

Tab.12: Projektionsfaktor f_p als Funktion der Sonnenhöhe h in Grad (nach Fanger, 1972).

Sonnenhöhe h	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
a. stehend										
von vorne	0,35	0,34	0,33	0,31	0,28	0,24	0,20	0,16	0,12	0,08
seitlich	0,23	0,23	0,22	0,21	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,08
gemittelt- über Azimuth	0,30	0,30	0,30	0,27	0,24	0,21	0,18	0,13	0,11	0,08
b. sitzend										
von vorne	0,30	0,30	0,29	0,29	0,30	0,28	0,26	0,24	0,21	0,18
von hinten	0,30	0,27	0,20	0,15	0,16	0,16	0,15	0,16	0,17	0,18
seitlich	0,22	0,22	0,23	0,24	0,25	0,23	0,22	0,19	0,18	0,18
gemittelt- über Azimuth	0,26	0,25	0,24	0,23	0,24	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18

Bei hohen thermischen Belastungen durch Strahlungsenergie ist meist die direkte Sonnenstrahlung der bedeutendste Term des Strahlungsbaldos. Die Intensität der direkten Sonnenstrahlung ist stark von der Sonnenhöhe h abhängig. Der von der Körperoberfläche absorbierte Anteil von I_0 hängt von der zur Einstrahlung senkrecht projizierten Oberfläche A_p ab. So steigt z.B. die Intensität von I_0 mit wachsender Sonnenhöhe an, während die Projektionsfläche A_p eines stehenden Menschen abnimmt. Die vom Menschen absorbierte direkte Sonnenstrahlung I berechnet sich zu:

$$I = I_0 \cdot A_p \cdot \alpha_{ir} \quad (68),$$

wobei I_0 die Strahlungsflußdichte der direkten Sonnenstrahlung, A_p die Projektionsfläche des Menschen senkrecht zur Einstrahlungsrichtung von I_0 und α_{ir} der Absorptionskoeffizient für solare Strahlung der betreffenden Oberfläche (Haut, Kleidung) sind.

Ein Maximum des absorbierten Strahlungsanteiles I von der direkten Sonnenstrahlung I_0 stellt sich nach Jendritzky et al. (1979) für einen stehenden Menschen bei einer Sonnenhöhe von 27 Grad ein. Der Kompensationseffekt zwischen Strahlungsintensität und wirksamer Oberfläche, der für den thermischen Komfort eines stehenden Menschen als sehr günstig erscheint, ist bei einer liegenden Person nicht vorhanden. Im Gegenteil wächst hier mit der Strahlungsintensität auch die wirksame Oberfläche A_p , und das Maximum der absorbierten direkten Sonnenstrahlung während des Tages liegt zum Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes vor.

Die für die direkte Sonnenstrahlung beschriebenen Prinzipien gelten natürlich auch für künstliche gerichtete Strahlungsquellen, wie z.B. Infrarotstrahler oder sog. Höhensonnen.

Bei diffusen und ungerichteten Strahlungsflüssen, wie der diffusen Himmelsstrahlung oder der atmosphärischen Gegenstrahlung ist als Absorptionsfläche jeweils der entsprechende Anteil von A_{eff} anzusetzen. Für die diffuse Himmelsstrahlung ergibt sich danach bei freiem Horizont (Raumwinkel=0,5 Gesamtraumwinkel) eine effektive Oberfläche von $0,5 A_{eff}$. Dabei liegt die vereinfachende Annahme zugrunde, daß die in gegenseitigem Strahlungsaustausch stehenden Körperpartien, durch die die effektive Strahlungsoberfläche von A_{cl} auf A_{eff} verkleinert wird, auf der Körperoberfläche gleichverteilt sind.

Der Strahlungssaldo eines sich im Freien befindenden Menschen wird sehr stark von den Intensitäten der atmosphärischen Strahlungsflüsse geprägt, die wiederum sehr vom Bewölkungsgrad und der Bewölkungsart modifiziert werden. Berechnungen der einzelnen Strahlungsflüsse und des daraus resultierenden Strahlungssaldos wurden von Burt et al. (1982) für verschiedene Bewölkungsgrade und -arten durchgeführt. Diese Berechnungen zeigen einen starken Einfluß der Bewölkung auf den Strahlungssaldo und daraus resultierend auf die Hauttemperatur.

In der biometeorologischen Literatur (z.B. Fanger, 1972; Jendritzky et al. 1979, Terjung et al. 1981) hat sich zur Quantifizierung des Austausches an Strahlungsenergie von Lebewesen ein etwas modifizierter Ansatz des Strahlungssaldos verbreitet. Natürlich ändert sich durch

eine andere Art der Darstellung nichts an der Bewertung der einzelnen Strahlungsflüsse. Die mit Einführung der "mittleren Strahlungstemperatur" T_{mrt} modifizierte Form erleichtert jedoch das Verständnis des Austausches von Strahlungsenergie und ermöglicht die Beschreibung des den Menschen umgebenden Strahlungsklimas mit nur einem einzigen Parameter. Deshalb wird der Strahlungssaldo eines Menschen im weiteren als Funktion der mittleren Strahlungstemperatur angesetzt.

Die Strahlungstemperatur einer Oberfläche ist definitionsgemäß diejenige Temperatur, die eine Oberfläche bei gleicher emittierter Strahlung hätte, wenn sie ein sog. "Schwarzstrahler" mit einem Emissionskoeffizienten $\epsilon = 1,0$ wäre. Die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} wird durch Mittelung der Strahlungstemperaturen aller Oberflächen im ganzen Raumwinkel berechnet, wobei eine Gewichtung nach den Raumwinkelanteilen eingeht. Für die atmosphärischen Strahlungsflüsse werden nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann ebenfalls Strahlungstemperaturen berechnet und mit dem entsprechenden Raumwinkelanteil gewichtet. Dabei ist der jeweilige Absorptionskoeffizient des Menschen zu berücksichtigen, da die kurzwelligen Strahlungsflüsse in einen uniformen langwelligen Strahlungsfluß transformiert werden. Die Absorptionskoeffizienten für kurzwellige Strahlung können sich jedoch, wie bereits erläutert deutlich von jenen für langwellige Strahlung unterscheiden. Die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} entspricht der Temperatur eines uniformen "Schwarzstrahlers", der den Menschen umgibt und zum gleichen wie dem aktuellen Strahlungssaldo des Menschen führt. Die mathematische Darstellung der mittleren Strahlungstemperatur ist in (69) angegeben zu:

$$T_{mrt} = \left(T_1^4 F_1 + \dots + T_n^4 F_n + A' F_A \sqrt{\epsilon} + \alpha_{ir} / (\epsilon \cdot \epsilon_p) (D F_A + I_o f_p + r' F_r) \right)^{0,25} - 273,2 \quad (69),$$

wobei aus Platzersparnis T_1 bis T_n die Strahlungstemperaturen der Oberflächen 1 bis n in Kelvin angesetzt sind, während sich T_{mrt} in $^{\circ}\text{C}$ ergibt. F_1 bis F_n sind die von den jeweiligen Oberflächen eingenommenen Raumwinkelanteile, F_A der Raumwinkelanteil des Himmels und F_r derjenige, aus dem die kurzwellige Reflexstrahlung r' kommt. Die Summe aller F_i und des Raumwinkelanteiles F_A muß 1,0 ergeben.

Die Strahlungstemperaturen der festen Oberflächen der Umgebung lassen sich sehr einfach mit Infrarotthermometern bestimmen oder bei bekanntem Emissionsvermögen der Oberflächen aus deren Temperaturen berechnen.

Die atmosphärischen Strahlungsflüsse I_0 , D und A' können entweder aus Messungen oder aus empirischen Gleichungen (Jendritzky et al., 1981) gefunden werden. Die jeweiligen Raumwinkelanteile können für geschlossene Räume und rechtwinklige Horizontbegrenzungen aus Nomogrammen (Fanger, 1972; Jendritzky et al., 1981; Burt et al., 1982) entnommen oder durch Horizontogramme bestimmt werden. Das letztere Verfahren

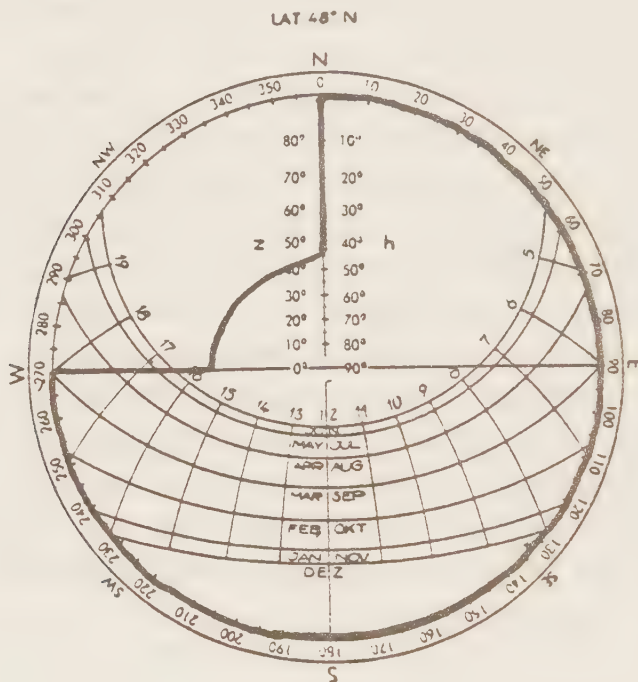


Abb.12: Horizontogramm einer Horizontüberhöhung von 45 Grad über einen Azimut von 90 Grad.

soll kurz beschrieben werden, da es in der biometeorologischen Literatur noch nicht eingeführt ist, und es auch die Möglichkeit bietet die Besonnungszeiten des zu untersuchenden Standortes zu bestimmen. In der Abbildung 12 sind dazu zusätzlich die Sonnenbahnen für verschiedene Monate in Abhängigkeit von der Tageszeit eingetragen. Vom Schnittpunkt der entsprechenden Sonnenbahn mit der eingetragenen Horizontüberhöhung wird der Standort abgeschattet, wenn vorher dort die

Sonne schien, oder besonnt, wenn vorher Schatten vorlag. Im Beispiel der Abbildung 12, in der eine Horizontüberhöhung von 45 Grad in Nord-West-Richtung über einen Azimut von 90 Grad vorgegeben ist, geht die Sonne um ca. 17 Uhr 20 hinter der Horizontüberhöhung unter.

Zur Bestimmung des Raumwinkelanteiles einer den Horizont einengenden Oberfläche kann man von einem Horizontogramm, das am Standort eines Menschen (Höhe ca 1,2 m) gefertigt wurde, ausgehen. In der Analyse des Horizontogrammes werden gleichartige Horizontüberhöhungen markiert, deren Raumwinkelanteil dann bestimmt werden kann, wie am Beispiel der Abbildung 12 gezeigt wird.

Da der Raumwinkelanteil als Anteil der Oberfläche einer Kugelschale, die den Standort umhüllt, definiert ist, kann für F_x folgende Gleichung (70) angegeben werden.

$$F_x = \sin \cdot h \cdot \alpha / 180^\circ \quad (70).$$

In (70) ist für h die Horizontüberhöhung und für α der Azimutwinkel einzusetzen. Für das angegebene Beispiel ergibt sich ein Raumwinkelanteil der vorgegebenen Horizontüberhöhung von 0,09. Setzt man für den Raumwinkelanteil des Bodens zu 0,50 an, so ergibt sich für den verbleibenden freien Himmel noch ein Raumwinkelanteil von 0,41. Das beschriebene Verfahren hat sich bei der Beurteilung des für den Menschen bedeutenden Strahlungsklimas in innerstädtischen Straßen, auf Plätzen und in Grünanlagen bewährt.

Mit Benutzung der mittleren Strahlungstemperatur als charakteristische Größe des Strahlungsklimas vereinfacht sich die Gleichung zur Berechnung des Strahlungssaldos des Menschen zu:

$$Q = A_{\text{eff}} \sigma ((T_{\text{mrt}} + 273,2)^4 - (T_o + 273,2)^4) \quad (71).$$

Gewöhnlich wird für T_o als maßgebliche Temperatur für die Strahlungsemission des Körpers die linear gemittelte Oberflächentemperatur der äußersten Körperschicht angegeben. Diese äußerste Körperschicht, die sich aus der Bekleidungsoberfläche und den unbedeckten Hautpartien zusammensetzt, weist häufig lokale Temperaturunterschiede von mehreren Kelvin auf. Der durch die lineare Mittelung entstehende relative Fehler bei der Ausstrahlung des Menschen, bei der die Oberflächentemperatur in vierter Potenz eingeht, liegt, einmal abgesehen von sehr extremen Klimasituationen, unter 1%.

Beim bekleideten Menschen, bei dem einmal die Haut und zum anderen die Kleidung als äußere Körperschicht anzusehen sind, bietet es sich an, die unterschiedlichen Körperoberflächen getrennt, wie in Abschnitt 2.2 bei der fühlbaren Wärme, zu betrachten. Gewöhnlich unterscheiden sich die Temperaturen der Hautoberfläche T_{sk} und der Kleidungsfläche T_{cl} um mehrere Kelvin. Zur Berechnung des Strahlungssaldos des Gesamtkörpers werden dann die Anteile der unbekleideten Hautoberfläche und der Kleidungsfläche addiert.

Damit ergibt sich zur Berechnung des Strahlungssaldos der unbekleideten Oberfläche eines Menschen:

$$Q_{Un} = (1 - z) \cdot A_{Du} \cdot f_{eff} \cdot \epsilon_{sk} \cdot ((T_{mrt} + 273,2)^4 - (T_{sk} + 273,2)^4) \cdot \sigma \quad (72)$$

Der Strahlungssaldo des bekleideten Oberflächenanteils wird entsprechend angesetzt:

$$Q_{Be} = (f_{cl} - 1 + z) \cdot A_{Du} \cdot f_{eff} \cdot \epsilon_{cl} \cdot ((T_{mrt} + 273,2)^4 - (T_{cl} + 273,2)^4) \quad (73)$$

(72) und (73) beinhalten zwei vereinfachende Annahmen. Bei der ersten Annahme wird vorausgesetzt, daß die Anteile der effektiven Strahlungsoberflächen bei den bekleideten und unbekleideten Oberflächen gleich groß sind und dem Faktor f_{eff} entsprechen. Die zweite Annahme ist, daß die Oberflächentemperatur der unbekleideten Hautoberfläche durch die mittlere Hauttemperatur T_{sk} dargestellt werden kann. Diese Annahme ist sicher bei sehr kühler Umgebung nicht mehr richtig. In solchen Situationen sind aber die unbekleideten Oberflächen gewöhnlich sehr klein, so daß der gemachte Fehler sich kaum auf den in (74) dargestellten Gesamtstrahlungssaldo Q eines Menschen auswirkt.

$$Q = Q_{Un} + Q_{Be} \quad (74).$$

In speziellen Fällen, in denen die getroffenen Annahmen die wirkliche Situation nur unzureichend beschreiben, können diese sehr leicht den jeweiligen Gegebenheiten angepaßt werden, wie z.B. beim Kontakt von Teilen der Körperoberfläche mit Festkörpern (Liegen, Sitzen). Hier muß die effektive Strahlungsoberfläche A_{eff} den Gegebenheiten entsprechend reduziert werden.

Bei hoher kurzweiliger Einstrahlung und stark unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten α_{ir} von Haut und Kleidung müßten die in (72)

und (73) eingehenden mittleren Strahlungstemperaturen T_{mrt} getrennt berechnet werden. Da α_{ir} in die Berechnung von T_{mrt} (69) eingeht, können sich dann für die Haut- und Kleidungsoberflächen unterschiedliche Strahlungstemperaturen ergeben.

Da der Strahlungssaldo zu den bedeutendsten Termen der menschlichen Energiebilanz gehört, ist die möglichst genaue Erfassung der beteiligten Strahlungsflüsse notwendig. Viele Autoren (z.B. Klein, 1948, Jendritzky et al., 1981; Roller et al., 1967) benutzen zur Quantifizierung der atmosphärischen Strahlungsflüsse I_0 , D und A' empirische Regressionsgleichungen. Dieses Verfahren ist sicher für klimatologische Aussagen zweckmäßig, kann aber für die Bestimmung des Strahlungssaldos eines Menschen, der sich zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort befindet keine befriedigenden Ergebnisse liefern. Vergleiche der aus den empirischen Gleichungen berechneten Strahlungsflüsse mit direkt gemessenen zeigten am Beispiel der Stadtatmosphäre große Diskrepanzen, die zu einer Fehleinschätzung des thermischen Milieus führen könnten. Die Unterschiede betrugen dabei nach Ergebnissen des Forschungsprojektes "STADTKLIMA - BAYERN" (Baumgartner et al. 1983) bis zu 20%.

Dies ist sicher darauf zurückzuführen, daß einige in die empirischen Gleichungen eingehende Parameter wie z.B. die Lufttrübung oder die vertikale Wasserdampfverteilung ohne die entsprechenden Messungen nicht exakt genug bestimmt werden können. Deshalb ist dem numerischen Verfahren zur Quantifizierung der Strahlungsflüsse die oftmals einfache Messung vorzuziehen.

Einfacher als die Bestimmung der atmosphärischen Strahlungsflüsse ist die Erfassung der Strahlungstemperaturen der einen Menschen umgebenden Oberflächen, die mit der modernen Infrarottechnik sehr einfach gemessen werden können.

In vielen Fällen ist die kurzwellige Reflexstrahlung r' ein bedeutender Faktor des menschlichen Strahlungssaldos, da sie eine größere Oberfläche des Mensch trifft als die direkte Sonnenstrahlung. Nach Messungen von Yamaguchi et al. (1979) kann eine Vernachlässigung von r' zu einem erheblichen Fehler des Strahlungssaldos führen.

Die auf einen Menschen einwirkende Strahlungsflußdichte kann sehr hohe Werte annehmen und die metabolische Rate bei weitem übersteigen. So wird von Wenzel et al. (1980) am Beispiel eines Menschen, der sich an

einer Walzstrasse in der Stahlindustrie befindet, ein Strahlungssaldo von über 1000 W angegeben. Dies entspricht in etwa dem fünffachen Wert der metabolischen Rate eines leicht arbeitenden Menschen.

Wenzel et al. (1980) betonen die Bedeutung der Kleidung als Schutz vor thermischer Belastung in Folge hoher Einstrahlung, wie sie z.B. in subtropischen Wüstengebieten anzutreffen ist. Die Autoren belegen diese Aussage durch vergleichende Messungen der Schweißraten bei bekleideter und unbekleideter Haut. Sie fanden, daß die Schweißraten bei Bekleidung im Mittel nur etwa 60% der Schweißraten ohne Bekleidung betrugen. Dieser Effekt ist durch eine Verlagerung der hauptsächlich am Strahlungsaustausch beteiligten Oberfläche und damit einer Verlagerung der hohen Oberflächentemperaturen von der Haut Bekleidungsfläche, auf der sich ja keine Thermosensoren befinden, zu erklären. Ähnliche Resultate liefern auch die in Abschnitt 7.3.2 erläuterten Berechnungen.

2.6 Der Energiefluß in die Atemluft

Die Atmung des Menschen ist der Vorgang, bei dem das "Außenklima" ungeschwächt in den menschlichen Körper eindringen kann. Um das gegen Temperatur- und Feuchteschwankungen sehr empfindliche Gewebe der Lungen und Bronchien zu schützen, wird die Atemluft in den oberen Atemwegen, die sich von der Nase bzw. vom Mund bis zum Kehlkopf erstrecken, auf die Kerntemperatur von ca. 37°C gebracht und mit Wasserdampf gesättigt. Nach Walker et al. (1961) vollzieht sich dieser Vorgang bis zu Temperaturen der Umgebungsluft von -100°C im kalten Bereich und nach Aikas et al. (1963) bis zu 100°C im warmen Bereich.

Wenn die Temperatur der Umgebungsluft niedriger als die Kerntemperatur ist (Regelfall), sorgen die oberen Atemwege bei der Expiration durch Abkühlung und teilweise Rekondensation des Wasserdampfes für eine Rückführung von Energie an den Körper. Hierbei können große Unterschiede zwischen der Atmung durch den Mund und durch die Nase auftreten, da die Nase durch ihre Form und Exposition ungeschützter den Außenbedingungen ausgesetzt ist und wesentlich bessere Austauschverhältnisse für Wärme und Wasserdampf aufweist.

Eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen hat gezeigt, daß die Temperatur der Atemluft bei Verlassen des Körpers von der Temperatur der Umgebungsluft abhängt (Leß et al., 1935; Seeley, 1940; McCutchan und Taylor, 1950, Webb, 1951, Pirlet, 1960; Aikas und Piironen, 1963; Höppe, 1979).

Obwohl diese Abhängigkeit unbestritten ist, gehen viele Autoren wie z.B. Fanger (1972) bei der Berechnung des Atemwärmeflusses E_{Re} von einer konstanten Expirationstemperatur aus. Diese Annahme mag für bestimmte Umgebungsbedingungen wegen des nur sehr geringen Fehlers berechtigt sein, führt jedoch bei extremen Außenklimaten und hoher Atemfrequenz, wie ein Vergleich in der Abbildung 13 zeigt, zu erheblichen Fehlern.

Zuerst jedoch soll die Berechnung der vom Körper aufzubringenden Leistung zur Anwärmung und Anfeuchtung der Atemluft erläutert werden. Der Energiefluß E_{Re} in die Atemluft berechnet sich aus der Enthalpiedifferenz der Luft zwischen Eintritt und Verlassen der Atemwege (Abel et al., 1977). Der Anteil fühlbarer Wärme an dieser Enthalpiedifferenz ist eine Funktion der Temperatur der Umgebungsluft T_a (Inspirationstemperatur) und der mittleren Temperatur der Luft bei Verlassen des Kör-

pers T_{exN} (mittlere Expirationstemperatur bei Nasenatmung). Der Fluß fühlbarer Wärme E_{Ref} berechnet sich zu:

$$E_{\text{Ref}} = c_p \cdot (T_a - T_{\text{exN}}) \rho_1 \cdot \text{AZV} \quad (75),$$

wobei c_p die spezifische Wärmekapazität der Luft, T_{exN} die mittlere Expirationstemperatur, T_a die Temperatur der Umgebungsluft, ρ_1 die Dichte der Atemluft und AZV das Atemzeitvolumen sind.

Bei der Berechnung von E_{Ref} sind folgende Dinge zu beachten: die Annahme, daß die Inspirationsluft mit der Außentemperatur in den Atemtrakt eintritt, ist nicht exakt richtig. Vielmehr zeigten von Höppe (1979) durchgeführte Messungen, daß die Inspirationstemperatur bei Beginn der Inspiration immer etwas höher als die Lufttemperatur T_a lag und sich ihr nur langsam anglich. Dies ist dadurch zu erklären, daß bei einer schnellen Abfolge von Inspiration und Expiration ein Teil der soeben ausgeatmeten Luft wieder eingeatmet wird. Ebenso führt die Erwärmung der Atemluft während des Überströmens von wärmeren Hautoberflächen vor dem Eintritt in den Atemtrakt zu höheren Inspirationstemperaturen. In diesem Fall stammt die dazu notwendige Energie jedoch auch aus dem Körper und führt daher, betrachtet man die gesamte Energiebilanz, zu keinem Fehler.

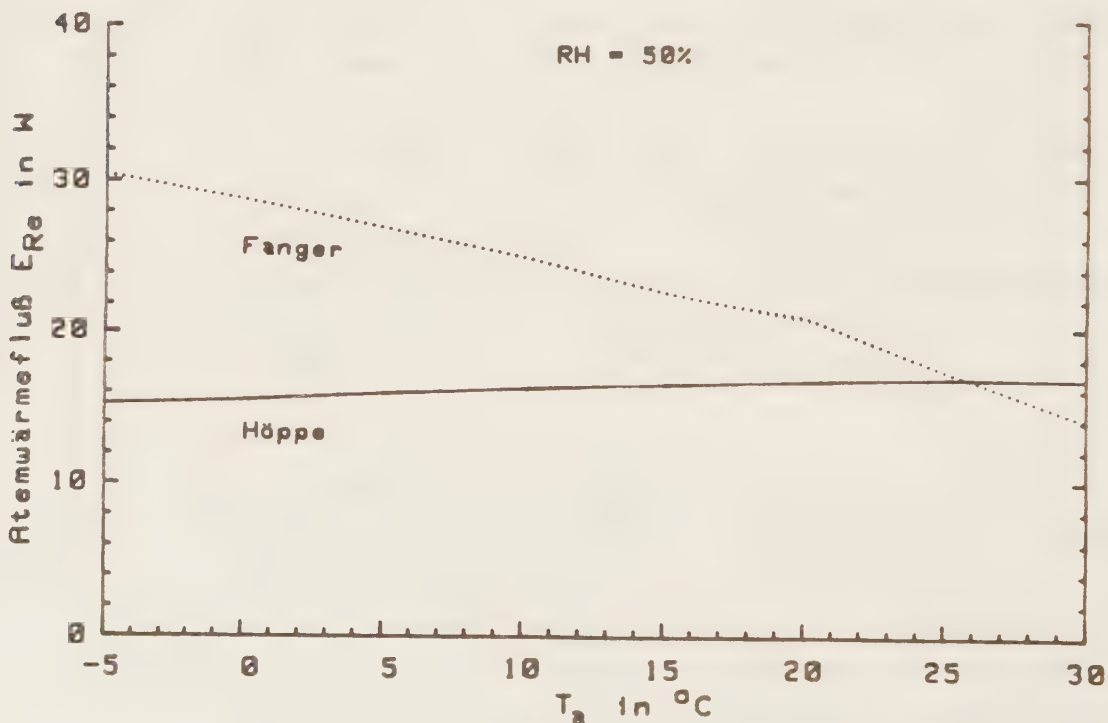


Abb.13: Vergleich des Atemwärmeflusses E_{Re} nach Fanger (1972) und nach Höppe (1979) in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a .

Auch die Expirationstemperatur ist nicht während der gesamten Expirationszeit konstant. Für die energetischen Berechnungen muß daher eine über den Ausatemvorgang gemittelte Expirationstemperatur verwendet werden. Diese mittlere Expirationstemperatur läßt sich nach den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen von Höppe (1979) in linearer Näherung für Nasen- (T_{exN}) und Mundatmung (T_{exM}) ((76) und (77)) als Funktion von T_a darstellen.

$$T_{\text{exN}} = 0,47 \cdot T_a + 21,0 \quad (T_a \text{ in } ^\circ\text{C}) \quad (76),$$

$$T_{\text{exM}} = 0,30 \cdot T_a + 27,0 \quad (T_a \text{ in } ^\circ\text{C}) \quad (77).$$

Die individuellen Unterschiede der Expirationstemperaturen lagen bei den Untersuchungen (Höppe, 1979) bei Nasenatmung bei ca. 1 K und bei Mundatmung, die in der Regel nur bei einer Behinderung der Nasenatmung betrieben wird, bei mehreren K.

Der größte Anteil am Energieaustausch durch die Atmung wird unter gewöhnlichen Klimabedingungen vom latenten Anteil des Atemwärmeflusses dargestellt. Er ist eine Funktion der Differenz aus den Wasserdampfdrücken der Expirations- und der Inspirationsluft. Der Dampfdruck der Inspirationsluft entspricht dabei dem Dampfdruck der Umgebungsluft e_1 , der Dampfdruck der Expirationsluft kann als Sättigungsdampfdruck bei der Expirationstemperatur angenommen werden. Hier liegt die Annahme zugrunde, daß die sich entlang der feuchten Schleimhaut abkühlende Luft bis zum Verlassen des Körpers immer gesättigt ist.

Eine relative Luftfeuchtigkeit der Expirationsluft von exakt 100% wird jedoch nicht zu messen sein, da die Flüssigkeit auf den Schleimhäuten als Lösung einen etwas geringeren Sättigungsdampfdruck als Wasser besitzt. Dieser Fehler wird jedoch teilweise dadurch kompensiert, daß bei der Berechnung der Sättigungsdampfdruck bei der linear gemittelten Expirationstemperatur eingeht. Weil der Sättigungsdampfdruck jedoch exponentiell von der Temperatur abhängt, führt die lineare Mittelung zu einem geringeren mittleren Wasserdampfdruck. Der latente Anteil des Atemwärmeflusses E_{Re1} berechnet sich zu:

$$E_{\text{Re1}} = 0,623 \cdot r / p (E(T_{\text{exN}}) - e_1) \rho_1 \cdot \text{AZV} \quad (78),$$

wobei r die Verdampfungswärme von Wasser (bei 37°C : $r=2,43 \cdot 10^6 \text{J/kg}$), p der Luftdruck, ρ_1 die Luftdichte und AZV das Atemzeitvolumen sind.

Der gesamte Atemwärmefluß E_{Re} bei Nasenatmung ergibt sich als Summe des fühlbaren E_{Ref} und des latenten E_{Re1} Anteiles zu:

$$E_{Re} = (c_p (T_a - T_{exN}) + 0,623 \cdot r/p \cdot (E(T_{exN}) - e_1)) \rho_1 \cdot AZV \quad (79).$$

Der Sättigungsdampfdruck bei der entsprechenden Expirationstemperatur kann durch die sog. Magnus-Formel als Exponentialfunktion der Expirationstemperatur angenähert werden.

$$E(T_{exN}) = 6,11 \cdot \exp(17,1 \cdot T_{exN} / (234,2 + T_{exN})) \quad (80).$$

Die Atemzeitmasse ($AZV \cdot \rho_1$), die von der jeweiligen Aktivität eines Menschen abhängt, wird von Fanger (1972) in guter Näherung durch die Zahlenwertgleichung (81) als Funktion der metabolischen Rate (in W) angegeben.

$$AZV = 1,44 \cdot 10^{-6} \cdot M \quad (\text{in kg/s}) \quad (81).$$

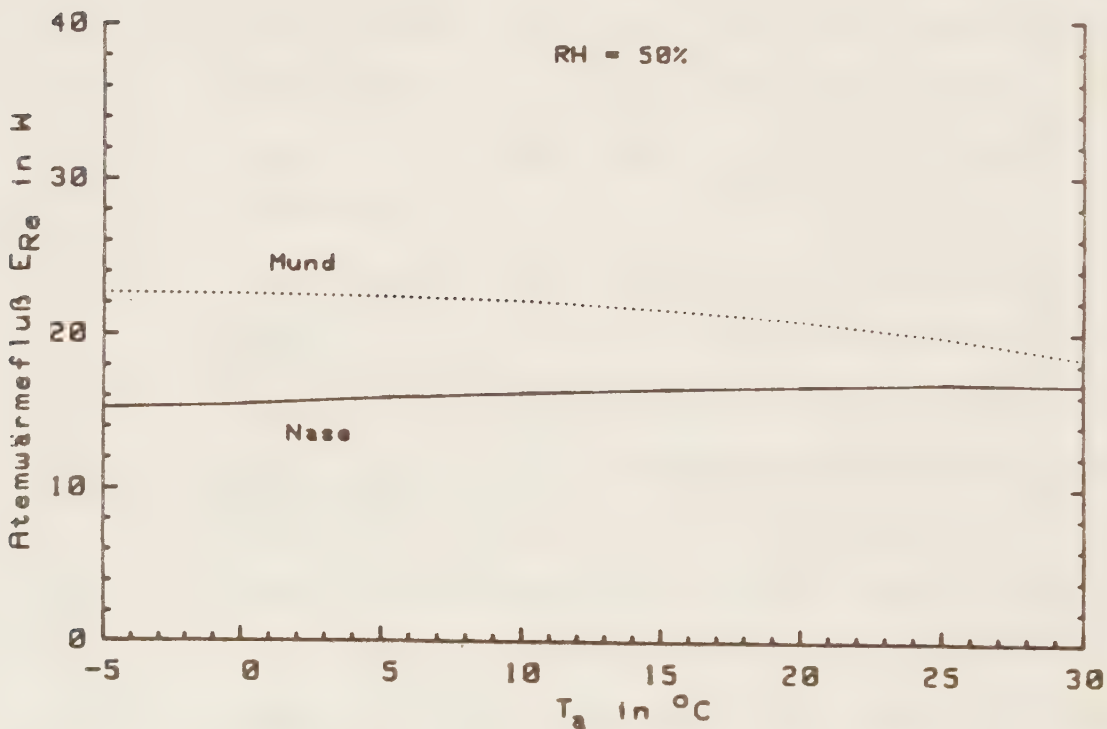


Abb. 14: Atemwärmefluß E_{Re} bei Mund- und Nasenatmung in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a .

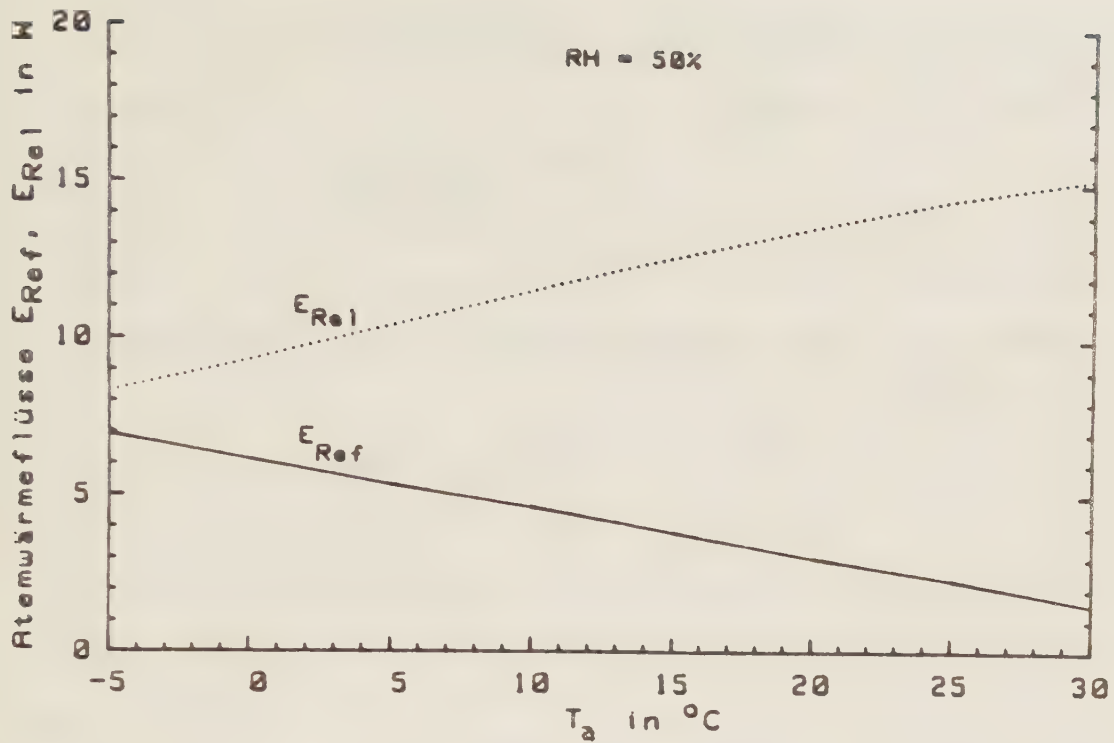


Abb.15: Fühlbarer- (E_{Ref}) und latenter (E_{Rel}) Anteil des Atemwärmeflusses bei Nasenatmung in Abhängigkeit von T_a .

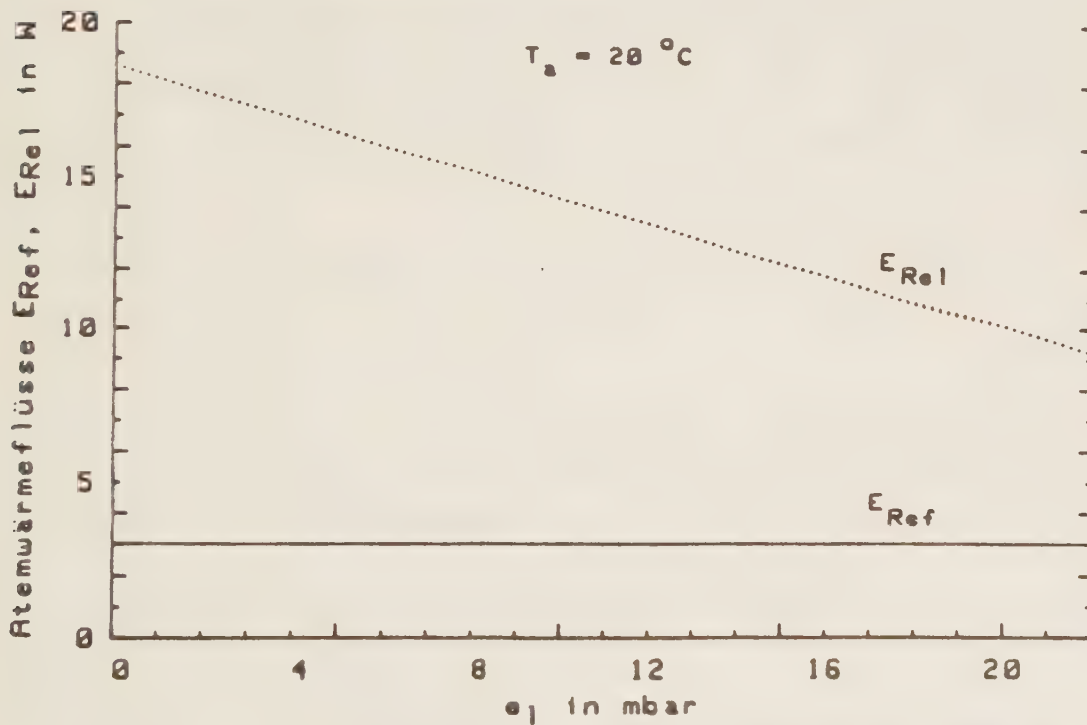


Abb.16: Fühlbarer- (E_{Ref}) und latenter (E_{Ref}) Anteil des Atemwärmeflusses bei Nasenatmung in Abhängigkeit vom Dampfdruck e_1 .

Nach Einsetzen von (76), (80) und (81) in (79) ergibt sich für die aufzubringende Leistung zur Anwärmung und Befeuchtung der Atemluft E_{Re} bei der Atmung durch die Nase:

$$E_{Re} = 1,44 \cdot 10^{-6} M (c_p (0,53 \cdot T_a - 21,0) + 0,623 r / p (6,11 \cdot e^{\frac{359,1 + 8,00 T_a}{255,2 + 0,47 T_a - e_1}})) \quad (82).$$

Die in den Abbildungen 14-16 aufgetragenen Atemwärmeflüsse wurden nach Gleichung (82) berechnet.

In der Abbildung 14 ist ein Vergleich von E_{Re} bei Nasen- sowie Mundatmung in Abhängigkeit von der Außentemperatur T_a dargestellt. Es zeigt sich eine deutlich höhere Leistung bei der Mundatmung vor allem bei kühlen Außenbedingungen. In der Abbildung 15 sind am Beispiel der Nasenatmung die Anteile fühlbarer- und latenter Wärmeflüsse getrennt in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a und in der Abbildung 16 vom Dampfdruck e_1 dargestellt. Die Abbildung 15 zeigt, daß unter den gegebenen Bedingungen der latente Wärmefluß E_{Rel} immer den fühlbaren E_{Ref} übersteigt. Die Differenz der beiden Anteile ist wegen des exponentiellen Anstiegs des Sättigungsdampfdruckes $E(T_{ex})$ der Atemluft mit steigender Expirationstemperatur bei den hohen Lufttemperaturen am größten. Wie aus der Abbildung 16 hervorgeht, wird bei einer Lufttemperatur $T_a = 20^\circ\text{C}$ sogar noch bei nahezu vollständig gesättigter Inspirationsluft dem Körper die ca. 3-fache Leistung des fühlbaren Wärmeflusses durch den latenten Wärmefluß entzogen.

2.7 Der Wärmeaustausch des Körpers mit der Nahrung

Um Verwechslungen und Mißverständnisse zu vermeiden, soll zuerst eine Abgrenzung des hier zu beschreibenden Wärmeflusses erfolgen.

Hier ist nicht die in der Nahrung gebundene Energie, die durch den Metabolismus freigesetzt wird, gemeint, sondern die fühlbare Wärme, die auf grund von Temperaturunterschieden zwischen der Nahrung und dem Inneren des menschlichen Körpers ausgetauscht wird. Dieser Wärmefluß wird in der Literatur meist nicht beachtet, da er gewöhnlich nur kurzzeitig während und kurz nach der Nahrungsaufnahme auftritt.

Der Wärmefluß aus der Nahrung kann aber in einigen Situationen, die im folgenden diskutiert werden sollen, die Größenordnung anderer Terme der Energiebilanz erreichen und sogar übersteigen.

In Mitteleuropa setzt sich die Nahrungsaufnahme in der Regel aus einer kalten Mahlzeit mit warmem Getränk (Frühstück), einer warmen Mahlzeit (Mittagessen) und einer kalten Mahlzeit mit kaltem Getränk zusammen.

Kalte Mahlzeiten und kalte Getränke haben in der Regel eine Temperatur, die zwischen der Kühlschrankschranktemperatur (ca. 8°C) und der Zimmertemperatur (ca. 20°C) liegt. Warme Mahlzeiten haben, wie eigene Messungen gezeigt haben, gewöhnlich Temperaturen zwischen 55°C und 70°C. Heisse Getränke wie z.B. Kaffee werden bevorzugt bei Temperaturen von 45°C bis 60°C bevorzugt getrunken.

Da der Hauptbestandteil der Speisen und Getränke Wasser ist, kann als Wärmekapazität der Nahrung in guter Näherung die von Wasser angenommen werden.

Der Wärmefluß von der Nahrung zum Körper errechnet sich danach zu:

$$N = m_N \cdot c_N \cdot (T_N - T_C) / t \quad (83),$$

wobei m_N die Masse der aufgenommenen Nahrung, c_N deren spezifische Wärmekapazität, T_N die Temperatur der Nahrung, T_C die Kerntemperatur und t eine charakteristische Zeit bis zur thermischen Anpassung sind.

Bei durchschnittlichen Mahlzeiten trinkt ein Mitteleuropäer ca. 1 Liter kalte- und 0,5 Liter heiße Getränke und nimmt jeweils ca. 0,5 kg heiße und kalte Speisen täglich zu sich.

Bei der beispielhaften Berechnung des Nahrungswärmeflusses N werden ausgehend von den experimentellen Untersuchungen als Speisetemperaturen für warme Speisen 60°C, für warme Getränke 50°C und für kalte Speisen und Getränke jeweils 14°C angesetzt.

Summiert man die dadurch verursachten Energiegewinne bzw. -verluste über den gesamten Tag auf, so ergibt sich für das genannte Beispiel ein Verlust von 69 kJ, entsprechend einer Leistung von 0,8 W.

Der Nahrungsenergiefluß N hat daher, betrachtet man einen gesamten Tagesverlauf, keine Bedeutung für den Energiehaushalt des Menschen. Während der Aufnahme der Nahrung jedoch können beachtliche Energieflüsse von der Nahrung oder zur Nahrung hin fließen. Dies soll an einigen Beispielen erläutert werden.

1. Das Essen von 0,25 l einer heißen Suppe (60°C) in einem Zeitraum von 5 Minuten. Hier ergibt sich ein Energiegewinn des Körpers von 24 kJ. Dieser Energiegewinn entspricht einer Leistung von 80 W.
2. Das Trinken von 2 Tassen Kaffee (0,25 l) in 10 Minuten. Während dieses Vorganges fließen 14 kJ in den Körper. Der Energiefluß beträgt in diesem Beispiel 23 W.
3. Das Essen eines Speiseeises ($T_N = -5^{\circ}\text{C}$) mit einer Masse von 0,1 kg innerhalb von 10 Minuten. Zur Anpassung der Speiseeistemperatur an die Kerntemperatur (inkl. Schmelzen) werden dem Körper 50 kJ entzogen, was in der angegebenen Zeit einer Leistung von -83 W entspricht.
4. Das Trinken von 1 l Bier ($T_N = 14^{\circ}\text{C}$) in einer Stunde (Biergartensituation). Dem Körper werden hierbei 96 kJ entzogen, entsprechend einer Leistung von -27 W.

Die Einzelbeispiele zeigen, daß der Nahrungswärmefluß N kurzzeitig in der Größenordnung der anderen Energieflüsse wie Konvektion oder Nettostrahlungsfluß des Menschen liegen kann. Er kann daher bei der Bewertung derartiger Situationen nicht vernachlässigt werden (z.B. bei der Klimatisierung von Kantinen oder Restaurants).

Neben der schon betrachteten Effekte kann die Aufnahme von kühler oder heißer Nahrung aber auch durch das Auslösen physiologischer Reaktionen Auswirkungen auf die Energiebilanz haben, indem z.B. die periphere Durchblutung der Gefäße dadurch beeinflusst wird.

2.8 Die Wärmespeicherung im Körper

Der Speicherwärme flu ß S fühlbarer Wärme im menschlichen Körper ist eine Folge der "gestörten" Energiebilanz, d.h. einer ungenügenden Entwärmung oder eines unzureichenden Schutzes vor Auskühlung.

Unter dem Wärme flu ß S ist hier nur der fühlbare Wärme flu ß zur Erwärmung oder Abkühlung der Körpermasse und nicht die Speicherung von potentieller Energie in körpereigenen Depots (Fett) zu verstehen, die nur bei Betrachtungen über längere Zeiträume zu beachten ist. Der Wärme flu ß S wird, von kurzzeitigen Schwankungen abgesehen, nur in außergewöhnlichen Situationen energetische Bedeutung erlangen. Die physiologischen Konsequenzen einer Wärmespeicherung oder deren Entzug aus der Körpermasse liegen in den damit verbundenen Temperaturänderungen des Körpers und dadurch hervorgerufenen physiologischen Prozessen im menschlichen Körper.

Um die wichtigen Organe des Körpers und damit den gesamten Körperkern vor derartigen Temperaturschwankungen zu bewahren, besitzt der Mensch zur Pufferung von Energieüberschu ß oder -defizit eine quasi poikilotherme (wechselwarme) Körperschale deren Temperaturänderungen in einem großem Schwankungsbereich keine physiologischen Nachteile für die Gesamtfunktion des Körpers hat. Nach Lehmann (1953) wird die sog. Kerntemperatur nur von ca. 50% der Körpermasse ständig im Bereich zwischen ca. $36,0^{\circ}\text{C}$ – $37,5^{\circ}\text{C}$ gehalten. Das Verhältnis der Körpermasse mit der Kerntemperatur zur Körpermasse mit schwankenden Temperaturen hängt sehr von den Umgebungsbedingungen und der Aktivität des betrachteten Menschen ab. So gilt auch sicher die von Burton (1935) aufgestellte Formel (84) zur Berechnung der mittleren Körpertemperatur T_M nicht allgemein.

$$T_M = 0,65 \cdot T_c + 0,35 \cdot T_{sk} \quad (84).$$

Nach Wenzel et al. (1980) verhält sich der Anteil der Körpermasse mit Kerntemperatur zu dem der wechselwarmen Körperschale in Ruhe wie 8:2. Bei harter Arbeit, bei der sich wegen der erhöhten Wärmeproduktion in den arbeitenden Muskeln höhere Temperaturen einstellen können, sind die Körpertemperaturen noch ausgeglichener.

Wird bei der experimentellen Bestimmung einer mittleren Körpertemperatur nur die Oberflächentemperatur des Körpers gemessen, so kann nach Büttner (1965) eine erhebliche Fehlinterpretation erfolgen, da

oftmals oberflächige Temperaturänderungen ausschließlich durch Blutmassenverlagerung verursacht werden. So wird z.B. kurz nach dem Schlafengehen eine Steigerung der Oberflächentemperatur des Einschlafenden festzustellen sein. Sie wird durch Vasodilatation, d.h. eine vermehrte Durchblutung der peripheren Gefäße verursacht, während die Kerntemperatur dadurch leicht sinkt. Es liegt hier folglich keine Aufheizung des Körpers, sondern nur eine Umverteilung der Körperwärme vor. Im Falle einer unausgeglichene Energiebilanz des Körpers sind die Körperschale und mit ihr vor allem die Extremitäten zuerst betroffen. Hier führt das Energiedefizit oder der -überschuß zuerst zu Temperaturänderungen.

Der Wärmefluß S kann als Funktion der Änderung der mittleren Körpertemperatur T_M berechnet werden zu:

$$S = c_K \cdot GE \cdot dT_M / dt \quad (85),$$

wobei c_K die spezifische Wärme des Körpers, GE seine Masse, T_M die mittlere Temperatur und t die Zeit sind.

In der Literatur sind für die mittlere spezifische Wärmekapazität c_K des Menschen leicht differierende Werte zu finden. So ist nach Goldman (1981) ein Wert von $3,47 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, nach Büttner (1938) $3,48 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ und nach Lehmann (1953) und Hentschel (1982) $3,35 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ anzusetzen. Diese Unterschiede lassen sich einmal durch verschiedenartige Bestimmungsverfahren, aber auch durch individuelle Unterschiede des Gewebes und des Körperbaues erklären.

Die Wärmekapazität von Wasser spielt hierbei eine große Rolle, da der menschliche Körper zu 60% bis 65% aus Wasser besteht (Faller, 1976). Die spezifischen Wärmekapazitäten von Knochengewebe liegen niedriger als die des Wassers. Fettgewebe dagegen besitzt eine höhere spezifische Wärmekapazität als Wasser.

In den folgenden quantitativen Betrachtungen wird eine mittlere Wärmekapazität des Menschen von $3,4 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ zugrunde gelegt.

Für die Körperfunktionen ist nicht primär die Quantität der Energiespeicherung, sondern die damit verbundene Temperaturänderung ΔT von Bedeutung. Sie berechnet sich zu:

$$T_M = S / (GE \cdot c_K) \cdot \Delta t \quad (86),$$

So kann bei gegebener thermischer Speicherung S das Erreichen eines für den Körper schädlichen Schwellenwertes prognostiziert werden. Nach Precht et al. (1955) liegt die maximale mittlere Körpertemperatur T_M (ohne irreversible Schäden) bei ca. 43°C , wobei natürlich individuelle Abweichungen möglich sind. Die nach Precht et al. (1955) höchste gemessene mittlere Körpertemperatur beträgt $43,5^\circ\text{C}$.

Im Abkühlungsbereich werden von Precht et al. (1955) folgende Schwellen angegeben.

$T_M = 34,0^\circ\text{C}$	Beginn des Zitterns
$T_M = 33,0^\circ\text{C}$	Retrograde Amnesie (Gedächtnislücken)
$T_M = 32,0^\circ\text{C}$	Verzögerung der Lebensfunktionen
$T_M = 26,5^\circ\text{C}$	keine Reaktion auf Ansprache
$T_M = 25,5^\circ\text{C}$	Erlöschen der Eigenreflexe (Pupillen)
$T_M = 18,0^\circ\text{C}$	tiefster gemessener Wert mit anschließend er Erholung.

An einem Beispiel sollen die Größenordnungen von S verdeutlicht werden, die zu den genannten Schwellenwerten führen.

Ausgangspunkt dieses Beispiels sei ein Mann mit einer Körpermasse von 75 kg, einer Kerntemperatur von 37°C und einer Hauttemperatur von 34°C , der sich im thermischen Komfort befindet. Um eine Überwärmung des Körpers auf den Schwellenwert von $T_M = 43,5^\circ\text{C}$ zu erreichen, muß die mittlere Körpertemperatur nach Burton (1935) von jetzt 36,0 auf $43,5^\circ\text{C}$, d.h. um 7,5 K, gesteigert werden. Die dazu erforderliche Energie beträgt 1793 kJ. Sollte diese Erwärmung innerhalb einer Stunde geschehen, wäre dazu eine Leistung S von 498 W notwendig.

Schwieriger ist eine derartige Quantifizierung bei der Abkühlung von Körpergewebe auf die unteren Temperaturschwellen, da eine sehr ungleiche Verteilung der Körpertemperaturen vom Kern zur Schale hin auftritt. Zudem werden hier individuelle Schwankungen bedeutender.

So können Erfrierungen der äußersten Körperschichten auftreten, während der Körperkern noch eine nahezu unveränderte Temperatur hat. Diese während der Abkühlung festzustellende Temperaturdifferenz zwischen Schale und Kern ist eine Funktion der Wärmeverlustrate S .

Unter der Annahme, daß die gesamte Körpermasse bis zur Letaltemperatur von 18°C abgekühlt wird (sicher nur im Wasser realistisch), würde dies einem Energieentzug von 4845 kJ bei der Körpermasse von 75 kg bedeuten.

Die Beispiele haben gezeigt, daß die Körpermasse und deren Wärmekapazität eine gute Abpufferung von kurzzeitigen Wärme- und Kältbelastungen des Körpers, selbst bei Versagen der Thermoregulation, die hier nicht in Betracht gezogen wurde, ermöglicht.

Geht man davon aus, daß $\frac{1}{3}$ der Körpermasse zur poikilothermen Schale des Menschen zu rechnen ist (hier 25 kg), so führt eine Energieaufnahme oder -abgabe von 85 kJ im Zeitraum von einer Stunde (entsprechend $S = 23,6 \text{ W}$) zu einer Erhöhung oder Senkung der Temperatur der Körperschale um 1 K, was vom Menschen ohne größere Befindensverschlechterung ertragen werden kann.

Die beschriebenen Erwärmungen der Körpermasse sind grundsätzlich von einer erhöhten Temperatur durch Fieber zu unterscheiden. Bei Fieber liegt nicht eine Unzulänglichkeit der Thermoregulation vor, sondern hier stellt sich die Kerntemperatur auf ein höheres Niveau ein, das wie beim gesunden Menschen konstant gehalten werden kann. S ist in diesem Fall nach Erreichen des neuen Temperaturniveaus, das vor allem durch Erzeugung innerer Energie gewonnen wurde, bei gleichbleibenden Außenbedingungen wieder unbedeutend.

Im Regelfall wird S nicht nach (85) sondern als Restglied aus der Energiebilanzgleichung nach Berechnung aller anderen Terme bestimmt.

3 Modell zur Berechnung der Körpertemperaturen

Neben den meteorologischen Parametern, wie der Lufttemperatur T_a , dem Dampfdruck e_1 , der Windgeschwindigkeit v und der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} (siehe 2.5) gehen in die Energiebilanzgleichung des Menschen von der Physiologie des Körpers gesteuerte Größen ein, wie die Kerntemperatur T_c , die mittlere Hauttemperatur T_{sk} , die Kleidungstemperatur T_{cl} und die Schweißrate SW . Die Schweißrate (siehe 2.4.2) kann nach (48) bzw. (51) als Funktion der Kerntemperatur und der mittleren Hauttemperatur dargestellt werden.

Daher verbleiben, setzt man die Kenntnis der meteorologischen Umgebungsbedingungen voraus, drei unbekannte Größen in der Energiebilanzgleichung - T_c , T_{sk} , und T_{cl} . Um diese Größen berechnen zu können, müssen neben der Energiebilanzgleichung zwei weitere unabhängige Gleichungen gefunden werden. Dazu bieten sich die Gleichungen zur Darstellung der Wärmeflüsse vom Körperkern zur Hautoberfläche F_{KH} und von der Hautoberfläche zur Bekleidungsoberfläche F_{KL} an.

3.1 Der Wärmefluß vom Körperkern zur Hautoberfläche

Der Wärmefluß F_{KH} vom Körperinneren zur Hautoberfläche setzt sich aus einem konvektiven Anteil F_{KHV} und einem konduktiven Anteil F_{KHD} zusammen.

$$F_{KH} = F_{KHV} + F_{KHD} \quad (87).$$

Der konduktive Anteil F_{KHD} ist die molekulare Wärmeleitung des Körpergewebes, während der konvektive Anteil den Wärmetransport durch das Kreislaufsystem, vor allem durch das Blut darstellt. Da jedoch in den meisten Situationen der konduktive Anteil wesentlich kleiner als der konvektive ist (Precht et al., 1955), wird er hier vernachlässigt. Diese Vernachlässigung kann bei einer geringen Blutzirkulation zu einer leichten Überschätzung der Kerntemperatur führen, da dann eine zu klein angesetzte Konduktivität durch einen größeren Temperaturgradienten kompensiert werden muß. Die Angabe der molekularen Leitfähigkeit des menschlichen Gewebes würde wegen der unterschiedlichen Bestandteile (Haut, Muskel, Knochen, Körperflüssigkeit) und

der Variabilität ihrer Schichtung an verschiedenen Körperteilen ein enormes Problem darstellen.

Der konvektive Anteil F_{KHV} von F_{KH} kann angesetzt werden zu:

$$F_{KHV} = A_{Du} \cdot h_B (T_c - T_{sk}) \quad (88),$$

wobei h_B eine Wärmeübergangszahl für konvektiven Wärmeaustausch ist. Der Wärmefluß F_{KHV} wird durch den Blutkreislauf gesteuert. An der Körperoberfläche findet ein Wärmeaustausch zwischen dem Blut und dem peripheren Gewebe statt, was zu einer annähernden thermischen Anpassung führt. Das abgekühlte Blut fließt dann wieder zum Körperinneren und wird dabei wieder auf die Kerntemperatur erwärmt. Die Wärmeübergangszahl h_B kann angesetzt werden zu:

$$h_B = V_B \cdot \rho_B \cdot c_B / 3600 \quad (\text{in W/(m}^2\text{K)}) \quad (89),$$

wobei V_B (in $l \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$) das pro Stunde an die Körperoberfläche transportierte Blutvolumen, ρ_B die Dichte und c_B die spezifische Wärme des Blutes sind. Nach Geigy (1968) beträgt die Dichte des Blutes $\rho_B = 1,06 \text{ kg/l}$ und dessen spezifische Wärme $c_B = 3,64 \cdot 10^3 \text{ J/(kgK)}$.

Das an die Körperoberfläche transportierte Blutvolumen V_B kann nach Gagge et al. (1971) als empirische Funktion der Haut- T_{sk} und Kerntemperatur T_c angegeben werden:

$$V_B = (6,3 + 75,0 \cdot (T_c - 36,6)) / (1 + 0,5 \cdot (34,0 - T_{sk})) \quad (90).$$

Aus (90) erhält man V_B in $l \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$, wenn man die Körpertemperaturen in $^{\circ}\text{C}$ einsetzt. Bei negativen Temperaturdifferenzen sind die entsprechenden Klammerausdrücke zu Null zu setzen. Als physiologisch maximal möglicher Wert für V_B werden von Gagge et al. (1971) $90 \text{ l} \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ genannt. Das Minimum ergibt sich aus (90) zu $6,3 \text{ l} \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$. Benützt man diese Extrema zur Abschätzung der konvektiven Wärmeübergangszahl h_B , so ergibt sich ein Wertebereich von $7,3 \text{ W K}^{-1} \cdot m^{-2}$ bis $96,5 \text{ W K}^{-1} \cdot m^{-2}$.

Damit ergibt sich für den Wärmefluß F_{KH} :

$$F_{KH} = V_B \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot A_{Du} (T_c - T_{sk}) \quad (91).$$

Das zirkulierende Blutvolumen V_B ist natürlich auch eine Funktion der Aktivitätsstufe. Je größer die körperliche Anstrengung ist, desto höher stellt sich die Herzfrequenz und damit die transportierte Blutmenge ein. Dieser Effekt ist in (90) durch den Einfluß der Aktivität auf die Körpertemperaturen berücksichtigt.

Da die gesamte im Körper in Wärme umgewandelte Energie H vermindert um den Energieverlust durch die Atmung E_{Re} zur Körperoberfläche fließen muß, falls keine Speicherung im Körper stattfindet, gilt:

$$F_{KH} = H + E_{Re} \quad (92).$$

Setzt man (91) mit (92) gleich und löst die erhaltene Gleichung unter Durchführung der notwendigen Fallunterscheidungen bezüglich V_B nach T_c auf, so erhält man 7 verschiedene Lösungen (93-99). Für die Fallunterscheidungen 1. und 2. ergeben sich je 2 Lösungen, da sie eine Quadratwurzel enthalten.

1. Wenn $T_c \geq 36,6^\circ\text{C}$ und $T_{sk} \leq 34,0^\circ\text{C}$

$$T_{c1} = (75,0 \cdot T_{sk} + 2738,7) + ((75,0 \cdot T_{sk} + 2738,7)^2 - 300,0(2738,7 \cdot T_{sk} - (18,0 - 0,5 \cdot T_{sk})(H + E_{Re}) \cdot 3600,0 / (A_{Du} \cdot \xi_B \cdot c_B)))^{0.5} / 150,0. \quad (93).$$

$$T_{c2} = (75,0 \cdot T_{sk} + 2738,7) - ((75,0 \cdot T_{sk} + 2738,7)^2 - 300,0(2738,7 \cdot T_{sk} - (18,0 - 0,5 \cdot T_{sk})(H + E_{Re}) \cdot 3600,0 / (A_{Du} \cdot \xi_B \cdot c_B)))^{0.5} / 150,0. \quad (94).$$

2. Wenn $T_c \geq 36,6^\circ\text{C}$ und $T_{sk} > 34,0^\circ\text{C}$

$$T_{c3} = (75,0 \cdot T_{sk} + 2738,7) + ((75,0 \cdot T_{sk} + 2738,7)^2 - 300,0(2738,7 \cdot T_{sk} - (H + E_{Re}) \cdot 3600,0 / (A_{Du} \cdot \xi_B \cdot c_B)))^{0.5} / 150,0. \quad (95).$$

$$T_{c4} = (75,0 \cdot T_{sk} + 2738,7) - ((75,0 \cdot T_{sk} + 2738,7)^2 - 300,0(2738,7 \cdot T_{sk} - (H + E_{Re}) \cdot 3600,0 / (A_{Du} \cdot \xi_B \cdot c_B)))^{0.5} / 150,0. \quad (96).$$

3. Wenn $T_c < 36,6^\circ\text{C}$ und $T_{sk} > 34,0^\circ\text{C}$

$$T_{c5} = (H + E_{Re}) \cdot 3600,0 \cdot (1,0 + 0,5(34,0 - T_{sk})) / (A_{Du} \cdot \xi_B \cdot c_B \cdot 6,3) \quad (97).$$

4. Wenn $T_c < 36,6^\circ\text{C}$ und $T_{sk} < 34,0^\circ\text{C}$

$$T_{c6} = (H + E_{Re}) \cdot 3600,0 / (A_{Du} \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot 6,3) + T_{sk} \quad (98).$$

5. Wenn $V_B > 90,0 \text{ l h}^{-1} \text{m}^{-2}$

$$T_{c7} = (H + E_{Re}) \cdot 40,0 / (A_{Du} \cdot \rho_B \cdot c_B) + T_{sk} \quad (99)$$

Die Fallunterscheidungen (1-5) müssen getroffen werden, da die Größen T_c und T_{sk} , die in (90) eingehen, noch unbekannt sind, und daher eine Aussage über das Unter- oder Überschreiten der Schwellenwerte von $36,6^\circ\text{C}$ bzw. $34,0^\circ\text{C}$ nicht möglich ist.

Die Ansätze für T_c können nun in (48) bzw. (51) zur Berechnung der Schweißrate eingesetzt werden, die als einzige in die Energiebilanzgleichung eingehende Größe eine Funktion der Kerntemperatur ist. Die weiterführenden Berechnungen müssen für jede der 7 Lösungen $T_{c1} - T_{c7}$ getrennt durchgeführt werden. Erst nach der endgültigen Berechnung von allen sich ergebenden T_c und T_{sk} kann entschieden werden, welcher der Ansätze für T_c der richtige ist.

3.2 Der Wärmefluß durch die Bekleidung

Nimmt man an, daß die von der Kleidung bedeckte Hautoberfläche die gleiche Größe wie die Oberfläche der Kleidung hat, so ergibt sich für den Wärmefluß F_{KL} durch die Bekleidung:

$$F_{KL} = A_{Be} / R_{c1} \cdot (T_{c1} - T_{sk}) \quad (100),$$

wobei A_{Be} die Oberfläche der Bekleidung und R_{c1} (in $\text{m}^2\text{K/W}$) der Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung, T_{c1} die Temperatur der Kleidungs-oberfläche und T_{sk} die mittlere Hauttemperatur sind. Der Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung wird in Kapitel 4 eingehend diskutiert.

Die Größe der Bekleidungs-oberfläche A_{Be} entspricht in der Regel nicht der von der Kleidung bedeckten Hautoberfläche.

Vergleicht man die beiden Oberflächen an einem Beispiel mit $f_{c1} = 1,15$ $z = 0,8$, so ergibt sich eine um 19% größere Kleidungs-oberfläche als die

von der Kleidung bedeckte Hautoberfläche. Dieser Vergleich zeigt, daß für die physikalisch sinnvolle Quantifizierung dieses nach außen divergierenden Wärmeflusses F_{KL} oftmals besser, ein zylindrisches Modell, wie in der Abbildung 17 dargestellt, als die Annahme gleichgroßer paralleler Ebenen der Kleidung und der Haut geeignet ist.

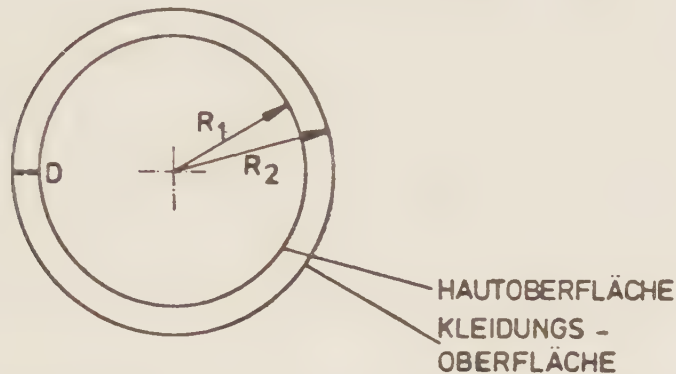


Abb.17: Zylindrisches Modell für den Wärmefluß F_{KL} von der Haut zur Kleidungsoberfläche.

Nach Schlünder (1972) kann der Wärmefluß zwischen zwei Zylinderschalen nach Gleichung (101) berechnet werden, die entsprechend den Bedingungen am menschlichen Körper abgewandelt wurde.

$$F_{KL} = 2 \pi \cdot HZ \cdot D \cdot (T_{cl} - T_{sk}) / (I_{cl} \cdot \ln(R2/R1)) \quad (101),$$

wobei HZ die Höhe des Zylinders, D die Schichtdicke der Bekleidung, R1 der Körperradius und R2 der Radius des bekleideten Körpers sind.

Die Höhe HZ des fiktiven Zylinders wird in diesem Fall als Funktion der Körpergröße GR und eines Bekleidungsfaktors Y, der das Verhältnis der bekleideten Körperlänge zur gesamten Körpergröße angibt, dargestellt werden.

$$HZ = Y \cdot GR \quad (102).$$

Die Größenordnung von Y kann durch einfache Überlegung unter Berücksichtigung der üblichen Bekleidungsgewohnheiten angegeben werden (Tabelle 13). Die Bekleidungsgewohnheiten zeichnen sich dadurch aus, daß bei wärmerer Kleidung (höherer clo-Wert) auch in der Regel eine größere Körperoberfläche bedeckt ist.

Tab.13: Bekleidungsfaktor Y bei verschiedenen Wärmedurchgangswiderständen der Kleidung I_{cl} (in clo).

	Y
$I_{cl} > 2,0$	1,0
$2,0 \geq I_{cl} > 0,6$	$(GR - 0,2) / GR$
$0,6 \geq I_{cl} > 0,3$	0,5 GR
$0,3 \geq I_{cl} > 0,1$	0,1 GR
$I_{cl} \leq 0,0$	0,0

Da nun die Höhe der Zylinder und ihre Mantelflächen bekannt sind, können die Radien R1 und R2 berechnet werden.

Der Wärmefluß F_{KL} durch die Kleidung muß der Summe der Wärmeflüsse von der Bekleidungs Oberfläche entsprechen, wenn man keine Wärmespeicherung in der Kleidungsschicht annimmt. Danach kann F_{KL} auch als Funktion des Flusses fühlbarer Wärme L_{Be} und des Nettostrahlungsflusses Q_{Be} von der Kleidungs Oberfläche angesetzt werden.

$$F_{KL} = L_{Be} + Q_{Be} \quad (103).$$

3.3 Das Berechnungsverfahren

Die Ansätze (100) bzw. (101) und (103) können durch Gleichsetzen und Auflösen nach T_{sk} in eine Bestimmungsgleichung für die mittlere Hauttemperatur umgeformt werden. Benützt man dabei (100), so ergibt sich:

$$T_{sk} = T_{cl} + (L_{Be} + Q_{Be}) I_{cl} / A_{Be} \quad (104).$$

Setzt man nun auch (104) in die Energiebilanzgleichung (105), die sich aus (5) und den im Kapitel 2 erläuterten Ansätzen ergibt, so

erhält man einen Ansatz, der außer von den meteorologischen Parametern, der Aktivität, der Bekleidungsisolation und unveränderlichen Körpermerkmalen, nur noch von der Bekleidungstemperatur T_{cl} abhängt.

Im weiteren sollen nur Situationen untersucht werden, in denen sich der Mensch in einem stationären thermischen Zustand befindet, d.h. die Körpertemperaturen nach einer gewissen Anpassungszeit zeitlich konstant sind. Nach experimentellen Untersuchungen von Clark (1981) kann man den stationären Zustand in guter Näherung nach einer Anpassungszeit von ca. 20 Minuten annehmen.

Unter stationären thermischen Bedingungen kann definitionsgemäß keine Wärmespeicherung im Körper auftreten ($S=0$). Bei extremen thermischen Bedingungen ist es möglich, daß ein Erreichen des stationären Zustandes wegen des begrenzten thermoregulatorischen Vermögens des Körpers nicht möglich ist. Ein längerer Aufenthalt unter solchen klimatischen Verhältnissen muß zu einem Hitzekollaps, oder zum Erfrieren führen.

Die erweiterte Energiebilanzgleichung (105) lautet für das Beispiel eines Mannes und $S = 0$, $N = 0$, $C_{KD} = 0$, $E_{phys} > 0$ und $E_{pot} > E_{phys}$:

$$\begin{aligned} & M(1,0-\eta) + h_c(T_a - T_{sk})A_{Du}(1,0-z) + h_c(T_a - T_{cl})A_{Du}(z+f_{cl}-1,0) + A_{eff} \cdot \\ & (1,0-z) \epsilon_{sk} \sigma ((T_{mrt}+273,2)^4 - (T_{sk}+273,2)^4) + f_{eff} A_{Du}(z+f_{cl}-1,0) \cdot \\ & \epsilon_{sk} \sigma ((T_{mrt}+273,2)^4 - (T_{cl}+273,2)^4) + 0,623r/p(e_1 - E(T_{ex})) + c_p(T_a - \\ & T_{ex})) M 1,44 \cdot 10^{-6} + r/(7,9 \cdot 10^6) A_{Du}(1,0-b)(e_1 - E(T_{sk})) - 304,94(T_B - 36,6) \cdot \\ & A_{Du}/(3,6 \cdot 10^{-6}) \quad r = 0 \end{aligned} \quad (105).$$

Folgende Größen können noch in (105) substituiert werden:

h_c	aus der Tabelle 5,
T_{sk}	aus (104),
z	aus der Tabelle 8,
f_{cl}	aus der Tabelle 7,
A_{eff}	aus (66),
T_{mrt}	aus (69),
T_{ex}	aus (76),
$E(T_{ex})$	aus (80),
b	aus (53),
T_B	aus (47) und das darin enthaltene T_c aus (93)-(99).

Es ist nun möglich durch Iteration zu vorgegebenen Umgebungsbedingungen jeweils die Bekleidungstemperatur T_{cl} zu berechnen, mit der die Energiebilanzgleichung erfüllt ist:

Nach der Berechnung der Bekleidungstemperatur können die mittlere Hauttemperatur T_{sk} (104), die Kerntemperatur T_c (93)-(99), und damit alle Terme der Energiebilanzgleichung quantifiziert werden.

Als Eingangsparameter für die Modellrechnung werden benötigt:

1. Meteorologische Parameter: T_a , T_{mrt} , e , v , p .
2. Körperparameter: GR, GE, AL, Geschlecht, Körperposition, AKT.
3. Kleidungsparameter: I_{cl} , f_{cl}

Das hier vorgeschlagene Rechenverfahren unterscheidet sich prinzipiell von dem z.B. von Fanger (1972) angewandten Verfahren, das jedoch auch primär die Quantifizierung einer Kennziffer für das mittlere thermische Befinden (predicted mean vote - PMV) und nicht die Berechnung der Energieflüsse zum Ziel hatte. Er setzt immer die im Bereich der thermischen Neutralität erwarteten Werte der Parameter mittlere Hauttemperatur T_{sk} und Schweißrate SW an. Dadurch entsprechen T_{sk} und SW in thermisch belastenden Situationen nicht den sich wirklich einstellenden Werten. Das gilt natürlich dann auch für die von diesen Parametern abhängigen Wärmeflüsse. Dagegen versucht das hier angewendete Rechenverfahren die wirklichen Zustände zu beschreiben.

So ist im allgemeinen bei der Betrachtung der thermischen Belastung eines Menschen nicht der Speicherterm S von Bedeutung, der in einem weiten Bereich von Klimabedingungen vernachlässigbar ist, sondern die physiologischen Größen wie die mittlere Hauttemperatur die Kerntemperatur und die Schweißrate, die so vom Körper eingestellt werden, daß die Energiebilanz ohne Speicherung von Wärme ausgeglichen ist. Es stellt sich also die Frage mit welcher Haut- und Kerntemperatur und welcher Schweißrate kann die Energiebilanz eines Menschen unter vorgegebenen Bedingungen ohne Wärmespeicherung ausgeglichen werden? Die Wertung, inwieweit sich diese Größen dann auf die Behaglichkeit und das thermische Empfinden eines Menschen auswirken, ist primär eine Aufgabe von Physiologen. Bewertungsvorschläge sollen jedoch in Kapitel 6 diskutiert werden.

4 Die Thermophysiologie der Bekleidung

Neben der Wahl des Aufenthaltsortes ist die Wahl der Dicke und Art der Bekleidung die bedeutendste Beeinflussung des Wärmeaustausches zwischen dem Körper und der Umgebung. Die Hauptaufgabe der Bekleidung besteht, neben ihrer mechanischen Schutzwirkung und der Unterstreichung der Persönlichkeit durch Form- und Farbgebung, in ihrer thermischen Schutzwirkung. Allein durch die Wahl der geeigneten Bekleidung kann sich ein Mensch längere Zeit in jeder Region auf der Erde aufhalten. So ist auch die Redewendung zu verstehen, die besagt, daß es kein wirklich schlechtes Wetter gibt, sondern höchstens ungeeignete Bekleidung.

Die Kleidung kann den menschlichen Körper vor vielen Extremen der Umgebungsluftbedingungen, die den Energieaustausch beeinflussen, wie Lufttemperatur, Strahlung, Feuchtigkeit und bis zu einem gewissen Grade auch der Windgeschwindigkeit, schützen. Bei sehr hohen und sehr tiefen Lufttemperaturen kann die Bekleidung durch einen großen Wärmedurchgangswiderstand zu hohe Verluste oder Gewinne des Körpers an fühlbarer Wärme verhindern. Sie kann durch geeignete Wahl des Materials die auf den Körper fallende Strahlung zu einem großen Teil absorbieren oder reflektieren, oder allein dadurch von Vorteil sein, daß sie die Umsatzfläche der Strahlung von der Hautoberfläche abhebt.

Durch günstige Webart und Verwendung von Wasser und Wasserdampf durchlässiger oder undurchlässiger Materialien, kann die Kleidung das Benetzen der Haut von außen (Regen) verhindern, oder einem Wärmestau durch günstige Schweißverdunstungsmöglichkeiten vorbeugen.

Eine zu starke Abkühlung des Körpers bei hohen Windgeschwindigkeiten kann durch eine dichte Webart der verwendeten Materialien vermieden werden.

Die Strahlungseigenschaften verschiedener Bekleidungsarten wurden bereits in Abschnitt 2.5 diskutiert; die Feuchtedurchlässigkeit wurde in Abschnitt 2.3 und 2.4 angesprochen. Es verbleibt daher noch die Diskussion des Wärmedurchgangswiderstandes I_{cl} der Bekleidung.

In einer Vielzahl von experimentellen Untersuchungen wurden die Wärmedurchgangswiderstände verschiedenartigster Kleidungsstücke und Kleidungsensembles bestimmt. Bei den dazu angewandten Methoden müssen zwei unterschiedliche Verfahren betrachtet werden. Beim 1. Verfahren (z.B. Umbach, 1980, Mecheels et al., 1976) wird eine Stoffprobe auf eine heizbare Kupferplatte gelegt. Durch Bestimmung der Heizleistung und

der Oberflächentemperatur kann im stationären Zustand der Wärmedurchgangswiderstand berechnet werden. Das zweite Verfahren berücksichtigt die Körperform und die Körperhaltung des Menschen. Hierbei wird ein heizbarer, aus Kupfer geformter Körper verwendet. Bei den experimentellen Untersuchungen von Reifferscheid (1957) war dieser Körper eine Kugel (Frigorigraph), während bei neueren Untersuchungen von Sprague et al. (1974) oder Umbach (1982) ein dem Menschen ähnlicher Modellkörper Verwendung fand.

Da bei beiden Verfahren der Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} nach (100) als lineare Funktion des Temperaturunterschiedes der Kleidungsoberflächen berechnet wird, muß bei der Anwendung auf den Menschen unterschiedlich vorgegangen werden. Im Falle der auf einer ebenen Fläche liegenden Meßprobe muß der Wärmefluß durch die Kleidung F_{KL} nach (101), im Falle des Mensch - Modell - Verfahrens nach (100) berechnet werden. Oftmals fehlt jedoch in der Literatur bei der Angabe von I_{cl} - Werten der Hinweis auf das angewandte Meßverfahren.

Die in der Literatur angegebenen I_{cl} - Werte in clo oder $K m^2 W^{-1}$ ($1,0 \text{ clo} = 0,155 K m^2 W^{-1}$) sind in der Regel Mittelwerte über die gesamte bekleidete Körperoberfläche oder sogar über die gesamte Körperoberfläche. In Wirklichkeit treten aber je nach der Bekleidungsart große lokale Unterschiede des Wärmedurchgangswiderstandes auf. Die Angabe von I_{cl} in clo (nach Gagge et al., 1941) erleichtert jedoch die Charakterisierung der thermischen Eigenschaften der Bekleidung, indem sie viele Größen in einer einzigen vereint.

Ein Beispiel für Wärmedurchgangswiderstände verschiedener Kleidungsstücke ist in Tabelle 14 nach Sprague et al. (1974) wiedergegeben. Die experimentell an einer Puppe bestimmten clo-Werte sind effektive clo-Werte, die sich unter der Annahme ergeben, daß der thermische Widerstand des einzelnen Bekleidungsstückes als thermischer Widerstand einer, den ganzen Körper bedeckenden uniformen Bekleidung dargestellt wird. Dies ist bei den kalorimetrischen Verfahren mit dem Mensch - Modell leicht möglich.

Durch experimentelle Untersuchungen mit Kleidungsensembles, die sich aus den vorher thermisch charakterisierten Einzelstücken zusammensetzen, berechneten Sprague et al. (1974) empirische Gleichungen für den effektiven Wärmedurchgangswiderstand der Gesamtbekleidung I_{cl} aus denen der einzelnen Kleidungsstücke. Für übliche Bekleidung eines Mannes ergab sich:

$$I_{cl} = 0,727 \sum I_x + 0,113 \quad (106),$$

und für Damenbekleidung

$$I_{cl} = 0,770 \sum I_x + 0,050 \quad (107),$$

wobei I_{cl} der effektive Wärmedurchgangswiderstand der gesamten Bekleidung und $\sum I_x$ die Summe der effektiven Wärmedurchgangswiderstände der Einzelstücke sind.

Tab.14: Effektive Wärmedurchgangswiderstände I_x in clo einzelner Kleidungsstücke nach Sprague et al. (1974); $1 \text{ clo} \hat{=} 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Mann		Frau	
Kleidungsstück	I_x (clo)	Kleidungsstück	I_x (clo)
dünne Socken	0,03	Strumpfhose	0,01
dicke Socken	0,04	BH + Slip	0,05
Slip	0,05	Schuhe	0,04
Unterhemd	0,06	dünnes Kleid	0,17
T - Shirt	0,09	warmes Kleid	0,63
Schuhe	0,04	l. ä. Bluse	0,29
k. ä. Hemd	0,19	warmer Rock	0,22
l. ä. Hemd	0,29	leichte Hose	0,26
l. ä. Pullover	0,37	warme Hose	0,44
warmes Jacket	0,49	l.ä Pullover	0,37
lange Hose	0,32		

l. ä. = langärmelig k. ä. = kurzärmelig

So ergibt sich aus der Tabelle 14 und (106) für einen mit Socken, Unterhose, Unterhemd, langärmeligen Hemd, Hose, Schuhen und Jacket bekleideten Mann ein clo-Wert von 1,0. Für eine entsprechend bekleidete Frau (Slip, BH, Strumpfhose, Rock, Bluse, langärmeliger Pullover) ergibt sich ein clo-Wert von 0,8. Dieser Vergleich zeigt, daß die Wärmeisolation des Körpers durch übliche Damenbekleidung geringer ist

als die den Bekleidungsgewohnheiten entsprechende Kleidung eines Mannes. Der Unterschied wird vor allem durch die in der Regel nur dünn bekleideten Beine durch Röcke und Kleider verursacht.

Die in Tabelle 14 für die einzelnen Kleidungsstücke angegebenen clo - Werte wurden experimentell bei Windgeschwindigkeiten von ca. 0,2 m/s bestimmt. Sie setzen sich aus der Wärmeisolation der Kleidung und der an ihr haftenden ruhenden Luftschicht zusammen, die je nach Material und Windgeschwindigkeit veränderlich ist. Auch die unterschiedliche Durchlüftung von verschiedenartigen Bekleidungsmaterialien bei höheren Windgeschwindigkeiten hat einen Einfluß auf die effektive Wärmeisolation der Bekleidung.

Der Einfluß der Windgeschwindigkeit v auf den Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} eines Bekleidungsensembles wurde von Umbach (1982) an drei Bekleidungsensembles experimentell quantifiziert. Allgemein läßt sich danach die Bekleidungsisolation I_{cl} als Funktion der Windgeschwindigkeit v darstellen zu:

$$I_{cl} = I_{cl0} \cdot (a + b \ln v) \quad (108),$$

wobei I_{cl0} der bei Standardbedingungen ($v=0,1$ m/s, $T_a=15^\circ\text{C}$, $RH=50\%$) bestimmte Wärmedurchgangswiderstand und a und b empirisch gefundene Koeffizienten sind. Die Koeffizienten a und b wurden für folgende drei verschiedene Bekleidungstypen bestimmt:

Typ A: Gefütterter Straßenanzug, Baumwollhemd, Schuhe, Socken, Unterhemd, Slip.

Typ B: Overall, Schuhe, Socken, Unterhemd, Slip.

Typ C: Pullover, Baumwollhemd, lange Hose, Schuhe, Socken, Unterhemd, Slip.

Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen von Umbach (1982) sind in der Tabelle 15 dargestellt.

Die Abnahme des Wärmedurchgangswiderstandes der verschiedenen Bekleidungstypen mit zunehmender Windgeschwindigkeit ist für einen stehenden Menschen in der Abb.18 nach Berechnungen aus (108) und den Werten aus der Tabelle 15 aufgetragen.

Tab.15: Wärmedurchgangswiderstände I_{cl0} (in clo) verschiedener Bekleidungstypen mit den dazugehörigen Regressionskoeffizienten a und b der Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v und das Bestimmtheitsmaß r^2 (r^2 0,60 statistisch signifikant nach Umbach (1982)).

Bekleidungstyp	Aktivität	I_{cl0}	a	b	r^2
Typ A (Straßenanzug)	stehen	1,9	0,4	0,2	0,93
	gehen	1,2	0,2	0,1	0,94
Typ B (Overall)	stehen	1,5	0,3	0,2	0,94
	gehen	1,1	0,2	0,1	0,97
Typ C (Pullover,Hose)	stehen	1,8	0,5	0,2	0,96
	gehen	1,2	0,2	0,1	0,95

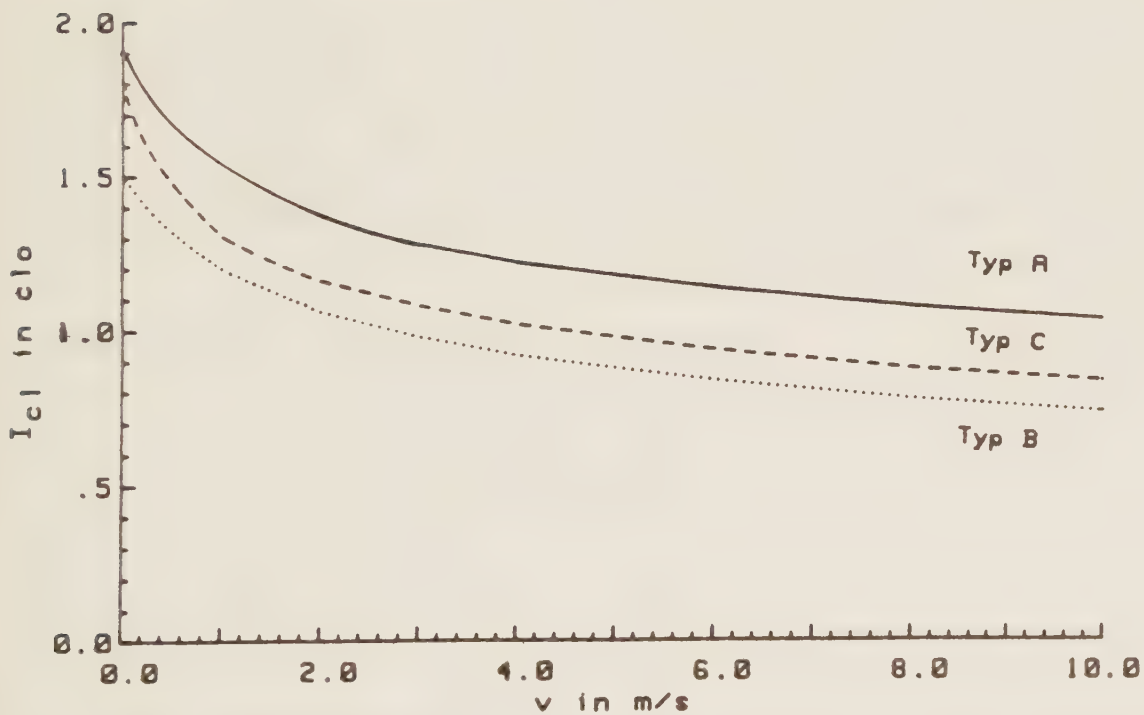


Abb.18: Abhängigkeit des Wärmedurchgangswiderstandes I_{cl} verschiedener Bekleidungsensembles eines stehenden Menschen von der Windgeschwindigkeit v (nach Umbach, 1982)

Die Tabelle 15 und die Abbildung 18 zeigen deutlich, daß bei der Berechnung des Wärmeflusses durch die Kleidung F_{KL} nicht von einem konstanten Wärmeisolationenwert I_{cl} ausgegangen werden sollte. Nach Umbach (1982) unterscheiden sich z.B. die Wärmeisolationenwerte des Straßenanzuges (Typ A) eines in nahezu ruhiger Luft ($v=0,1$ m/s) stehenden Menschen ($I_{cl} = 1,9$ clo) und eines einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s ausgesetzten Menschen ($I_{cl} = 1,0$) um annähernd den Faktor 2.

Auch die Anströmrichtung beeinflusst die Wärmeisolation der Kleidung. Nach Umbach (1982) ist dieser Einfluß jedoch geringer als der des Betrages der Windgeschwindigkeit und je nach Bekleidungstyp sehr unterschiedlich. Ein Versuch der Quantifizierung dieses Einflusses wird hier bei Abwägung der anderen Unsicherheiten nicht durchgeführt.

Bei den Berechnungen der Wärmeflüsse vom menschlichen Körper und der korrespondierenden Körper- und Bekleidungstemperaturen, wie sie in Kapitel 7 für verschiedene Klimate durchgeführt werden, ist der clo - Wert, soweit möglich, jeweils den Umgebungsbedingungen und der Aktivität entsprechend angesetzt worden. Da bei diesen Berechnungen die Energieflüsse von den bekleideten und den unbekleideten Körperoberflächen getrennt berechnet werden, muß ein für den Gesamtkörper angegebener clo - Index auf die effektiv bekleidete Körperoberfläche A_{Be} umgerechnet werden. So ergibt z.B. für den Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} einer kurzen Hose (ca. 15% der Körperoberfläche sind davon bedeckt), der für den Gesamtkörper zu 0,1 clo (Fanger, 1972) angegeben ist, für die wirklich bekleidete Oberfläche A_{Be} einen Wärmedurchgangswiderstand von 0,7 clo. Diese lineare Dreisatzrechnung ist hier statthaft, da der Wärmefluß durch die Kleidung F_{KL} sowohl linear von der Größe der Oberfläche, als auch vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} abhängt.

Abschließend zu diesem Abschnitt muß angeführt werden, daß der Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} einer der unsichersten Parameter der Energiebilanzgleichung ist, vor allem dann, wenn er angegeben wird, ohne daß entsprechende Messungen für das zu untersuchende Kleidungsensemble durchgeführt worden sind.

5 Die Wasserbilanz des Menschen

Die Erläuterung der Terme der menschlichen Wasserbilanz und deren Quantifizierung mit Ansätzen nach Fanger (1972) wurde vom Autor schon durchgeführt (Höppe, 1982). Da jedoch die in dieser Arbeit neu angesetzten Gleichungen für die Schweißrate (48 bzw. 51) und die Wasserdampfdiffusion (aus (42)) zum Teil erheblich andere Werte liefern, werden hier diese neuen Ergebnisse und deren Herleitung dargestellt.

Das vom menschlichen Körper benötigte Wasser wird mit der Nahrung in flüssiger Form aufgenommen. Es verläßt den Körper auf vier verschiedenen Wegen.

1. Durch Transpiration
2. Durch Wasserdampfdiffusion
3. Durch Anfeuchten der Atemluft
4. Über die Verdauungsorgane

Für die Physiologie des Menschen ist es bedeutend, auf welchem der genannten Wege das Wasser den Körper verläßt und wie sich der Gesamtverlust auf die einzelnen Möglichkeiten aufteilt. Der Energieentzug findet bei der Anfeuchtung der Atemluft lokal in den oberen Atemwegen; bei der Schweißverdunstung an der Hautoberfläche und bei der Wasserdampfdiffusion im Unterhautgewebe statt. Die Schweißverdunstung entzieht daher der Körperoberfläche, die Verdunstung von Wasser in die Atemluft dagegen dem Körperinneren Energie.

Mit dem Wasser werden dem Körper bei der Transpiration auch Salze und Mineralien entzogen, während bei der Wasserdampfdiffusion und Atemanfeuchtung nur reines Wasser entzogen wird.

Die Quantifizierung der Terme der Wasserbilanzgleichung des Menschen kann somit nützliche physiologische Zusatzinformationen liefern, die durch die Terme der Energiebilanzgleichung allein nicht offensichtlich werden.

5.1 Die Wasserbilanzgleichung

Die Wasserbilanzgleichung des Menschen hat die Form:

$$W_N + W_S + W_D + W_R + W_V + W_{Sp} = 0 \quad (109),$$

wobei W_N für die mit der Nahrung aufgenommene Wassermenge, W_S für die

Schweißsekretion, WD für die Wasserdampfdiffusion, WR für den Atemwasserverlust, WV für die Wasserausscheidung über die Verdauungswege und WSp für die Speicherung im Körper stehen. Als Einheit bietet sich aus Anschaulichkeitsgründen g/h an.

Betrachtet man längere Zeitskalen in der Größenordnung von Tagen, so kann der Speicherterm WSp entfallen. Die Vorzeichenregelung in (109) entspricht der bei der Energiebilanzgleichung.

Bei der Wasserausscheidung über die Verdauungswege wird dem Körper im Gegensatz zu den anderen Arten der Wasserausscheidung keine Verdunstungsenergie entzogen. Der Energieverlust des Körpers durch eine höhere Ausscheidungstemperatur (ca. 37°C) als Aufnahmetemperatur ist bereits mit dem Nahrungswärmefluß N in Abschnitt 2.7 berücksichtigt.

Die über die Verdauungswege mit dem Urin oder Kot ausgeschiedene Wassermenge WV soll hier nicht berechnet werden, da sie sich über einen längeren Zeitraum als Differenz der Wasseraufnahme und Wasserabgabe über die Haut und die Schleimhäute der Atemwege ergibt. Sie beträgt im Mittel nach Fallner (1976) ca. 1,5 l pro Tag, kann jedoch bei entsprechend größerer oder geringerer Wasseraufnahme stark schwanken.

Im folgenden Abschnitt 5.2 wird die Berechnungsmethodik der Größen WS, WD und WR, die von den meteorologischen Umgebungsparametern beeinflusst werden, erläutert.

5.2 Die Terme der Wasserbilanzgleichung

5.2.1 Der Wasserverlust durch Transpiration

Die dem menschlichen Körper durch Schweißsekretion entzogene Wassermenge WS entspricht der in Abschnitt 2.4.2 erläuterten Schweißrate SW. Sie kann daher aus (48) bzw. (51) als Funktion der Kerntemperatur, der mittleren Hauttemperatur, der Körperoberfläche und des Geschlechtes berechnet werden. Der Einfluß der meteorologischen Umgebungsparameter und der Aktivität ist durch deren Steuerfunktion der Körpertemperaturen gegeben.

5.2.2 Der Wasserverlust durch Wasserdampfdiffusion

Die Wassermenge WD, die dem Körper durch Wasserdampfdiffusion entzogen wird, ergibt sich durch Division von (42) durch die Verdunstungswärme r von Wasser. Dies ist physikalisch sinnvoll, da bei der Wasserdampfdiffusion das gesamte dem Körper entzogene Wasser den Körper in gasförmigem Zustand verläßt und daher der latente Wärmefluß E_D in linearer Relation zu WD steht. Der Wasserverlust WD ergibt sich daher zu:

$$WD = E_D / r \cdot 3,6 \cdot 10^6 \quad (\text{in g/h}) \quad (110).$$

5.2.3 Der Wasserverlust durch Respiration

Wie in Abschnitt 2.6 schon näher beschrieben, ist die Atemluft bei Verlassen des Körpers in der Regel feuchter als beim Eintritt. Das zur Anfeuchtung der Atemluft verwendete Wasser WR wird dem Körper entzogen. Der zur Verdunstung des Respirationswassers WR aufzubringende latente Wärmefluß kann nach (78) berechnet werden.

Wie bei der Wasserdampfdiffusion verläßt auch bei der Atmung das gesamte Wasser WR den Körper in gasförmigem Zustand. Deshalb ergibt sich für WR:

$$WR = E_{\text{Rel}} / r \cdot 3,6 \cdot 10^6 \quad (\text{in g/h}) \quad (111).$$

5.3 Quantitative Darstellung der Terme der Wasserbilanz

In den folgenden Abbildungen 19-26 sind die Abhängigkeiten der Transpiration WS, des Wasserverlustes WR durch die Atmung, durch Wasserdampfdiffusion WD und die Summe SUM aus diesen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a , der relativen Feuchte der Umgebungsluft RH und der Aktivitätsstufe M dargestellt. Die Berechnungen wurden im Falle des Mannes für eine Körpermasse von 80 kg und eine Größe von 1,8 m und im Falle der Frau für 60 kg und 1,6 m durchgeführt. Bei den Modellberechnungen wurde die Windgeschwindigkeit v zu 0,5 m/s angesetzt und die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} der Lufttemperatur T_a

gleichgesetzt. Als Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung I_{cl} wurde ein Wert von 1,0 clo gewählt.

Aus Abbildung 19 geht hervor, daß der totale Wasserverlust SUM des betrachteten ruhig stehenden Mannes bei einer Lufttemperatur von $T_a=30^\circ\text{C}$ nahezu konstant ist, was aus einer Zunahme der Schweißproduktion WS und einer gleichzeitigen Abnahme des diffundierenden Wassers WD und des Atemwassers WR resultiert. Der Gesamtwasserverlust SUM beträgt ca. 115 g/h.

Betrachtet man dagegen denselben Mann bei einer Lufttemperatur von 10°C (Abb.20), so treten hier, wegen der im gesamten Feuchtebereich fehlenden Schweißproduktion ($WS=0$), wesentlich geringere Werte von SUM auf. Sie liegen im Bereich zwischen 20 und 35 g/h. Auch die Wasserverluste durch Diffusion und durch die Respiration liegen unter denen bei $T_a=30^\circ\text{C}$.

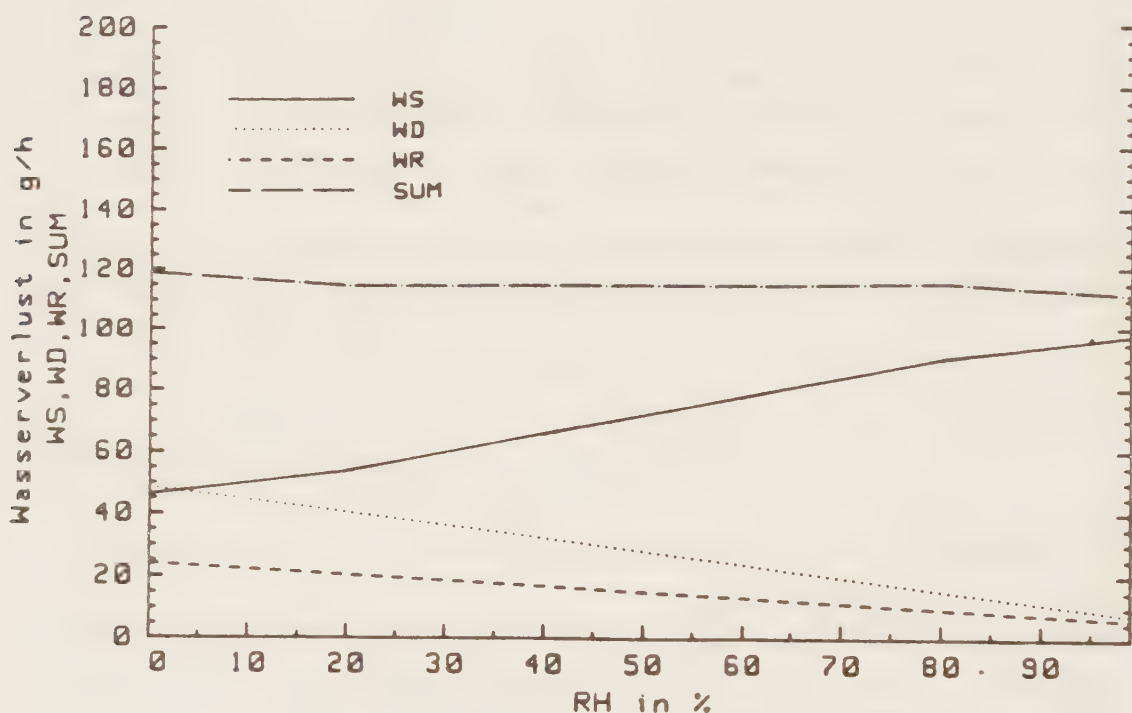


Abb.19: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH am Beispiel eines ruhig stehenden Mannes ($M=132\text{ W}$); $T_a=T_{mrt}=30^\circ\text{C}$, $v=0,5\text{ m/s}$.

Betrachtet man die Abhängigkeiten der Wasserverluste des ruhig stehenden Mannes von der Lufttemperatur T_a (Abb.21), so fällt der steile Anstieg des Gesamtwasserverlustes SUM im Bereich T_a 25°C auf, der eine Folge der nun rapide einsetzenden Schweißproduktion ist. Bei $T_a=30^\circ\text{C}$

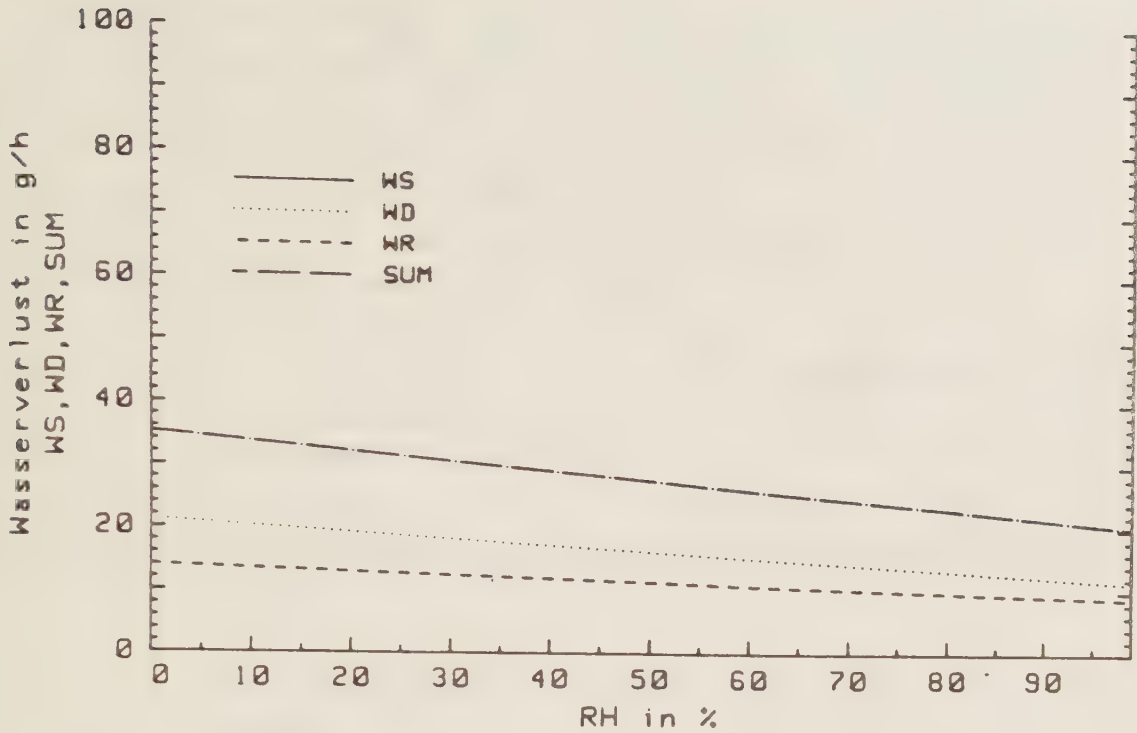


Abb.20: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH am Beispiel eines ruhig stehenden Mannes ($M=132 \text{ W}$); $T_a=T_{\text{mrt}}=10^\circ\text{C}$, $v=0,5 \text{ m/s}$.

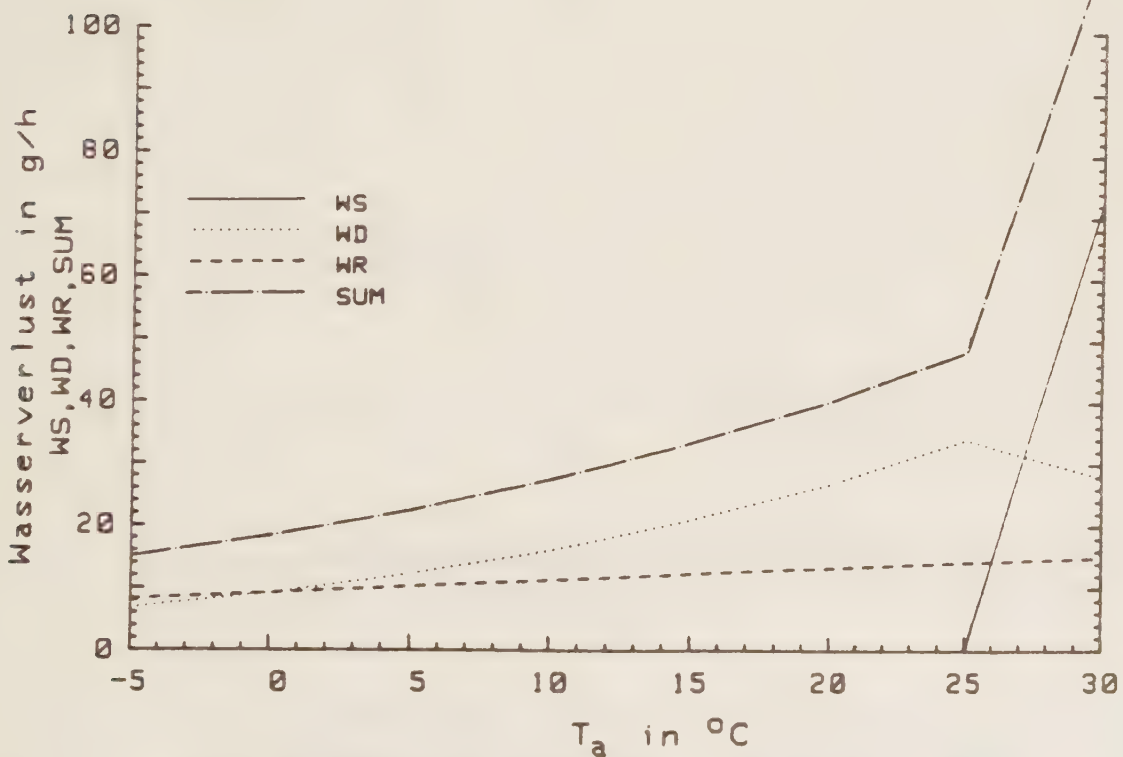


Abb.21: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a am Beispiel eines ruhig stehenden Mannes ($M=132 \text{ W}$); $RH=50\%$, $T_{\text{mrt}}=T_a$, $v=0,5 \text{ m/s}$.

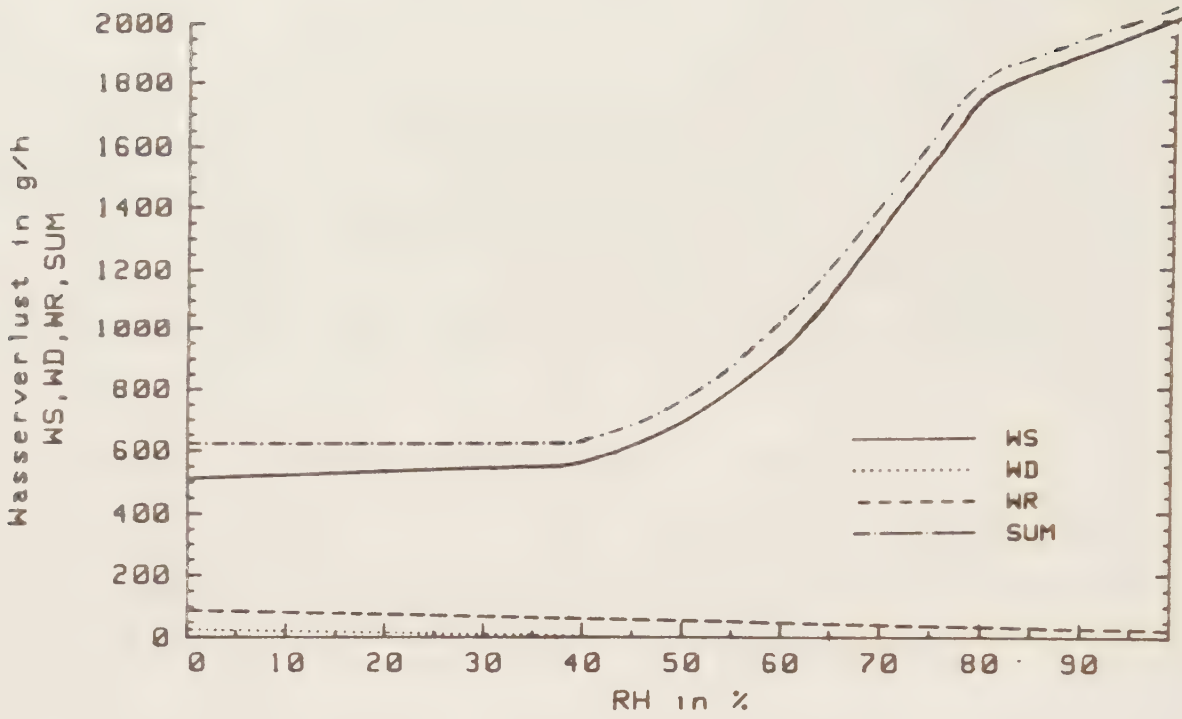


Abb.22: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH am Beispiel eines hart arbeitenden Mannes ($M=482$ W); $T_a=T_{mrt}=30^{\circ}\text{C}$, $v=0,5$ m/s.

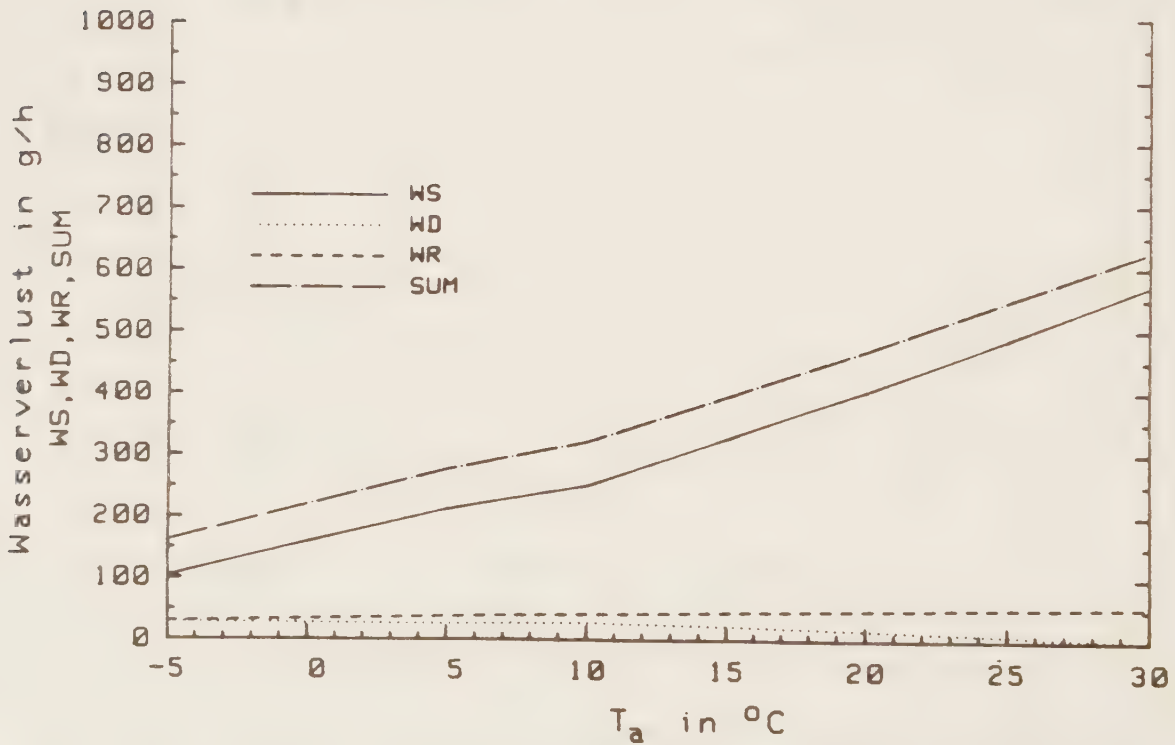


Abb.23: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a am Beispiel eines hart arbeitenden Mannes ($M=482$ W); $RH=50\%$, $T_a=T_{mrt}$, $v=0,5$ m/s.

wird ein Gesamtwasserverlust von 115 g/h erreicht. Bis zum Auslösepunkt der Schweißproduktion steigt die Wasserdampfdiffusion WD bis zu einem Wert von 34 g/h an und fällt dann wegen der steigenden Benetzung der Haut wieder ab. Der Wasserverlust durch die Atmung steigt bei der konstanten relativen Luftfeuchtigkeit leicht an, da bei höheren Lufttemperaturen durch die steigenden Expirationstemperaturen mehr Wasser zur Wasserdampfsättigung benötigt wird.

Die zu den Abbildungen 19 und 21 korrespondierenden Wasserverluste bei harter Arbeit sind in den Abbildungen 22 und 23 aufgetragen. Der bei weitem bedeutendste Wasserverlust bei dieser hohen Aktivitätsstufe ist die Schweißproduktion WS, die bei extrem hoher Luftfeuchtigkeit (RH 100) und der Lufttemperatur $T_a=30^{\circ}\text{C}$ den physiologischen Grenzwert von 2000 g/h erreicht.

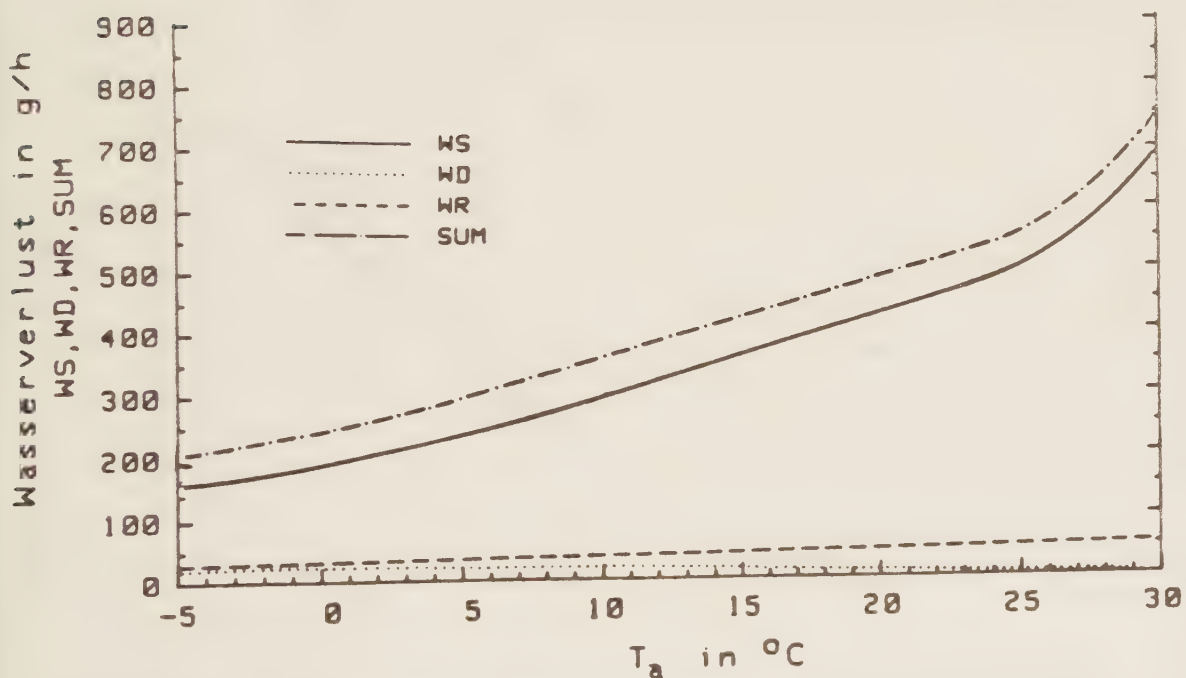


Abb.24: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a am Beispiel einer hart arbeitenden Frau ($M=459\text{ W}$); $\text{RH}=50\%$, $T_{\text{mrt}}=T_a$, $v=0,5\text{ m/s}$.

Durch das Annähern des physiologischen Grenzwertes ist auch die Abflachung der WS - Kurve bei $RH=80\%$ zu erklären. Auffallend (Abb.22) ist der steile Anstieg der Schweißproduktion nach Erreichen einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 50%. Vergleicht man diesen Verlauf mit dem bei ruhigem Stehen (Abb.19), so unterscheidet der Wasserverlust WS sich nicht nur durch die unterschiedlich hohen Werte, sondern auch durch den nahezu linearen Verlauf bei geringer Aktivität. Der Wasserverlust durch die Respiration ist unter den vorliegenden Bedingungen zu Abbildung 22 für den Gesamtwasserverlust bedeutungslos.

Der Wasserverlust über die Transpiration WS ist nach Abbildung 23 im gesamten untersuchten Temperaturintervall bei hoher Aktivität der größte Term der Wasserbilanzgleichung. Sogar bei einer Lufttemperatur $T_a = -5^{\circ}\text{C}$ werden vor allem wegen der erhöhten Kerntemperatur 100 g Schweiß pro Stunde ausgeschieden.

Vergleicht man die Wasserverluste des hart arbeitenden Mannes (Abb.22 und Abb.23) mit denen einer Frau mit gleichem Aktivitätsumsatz (Abb. 24 und Abb.25), so fällt bei konstanter relativer Luftfeuchtigkeit RH (Abb.23 und Abb.24) die höhere Schweißrate der Frau auf. Dies

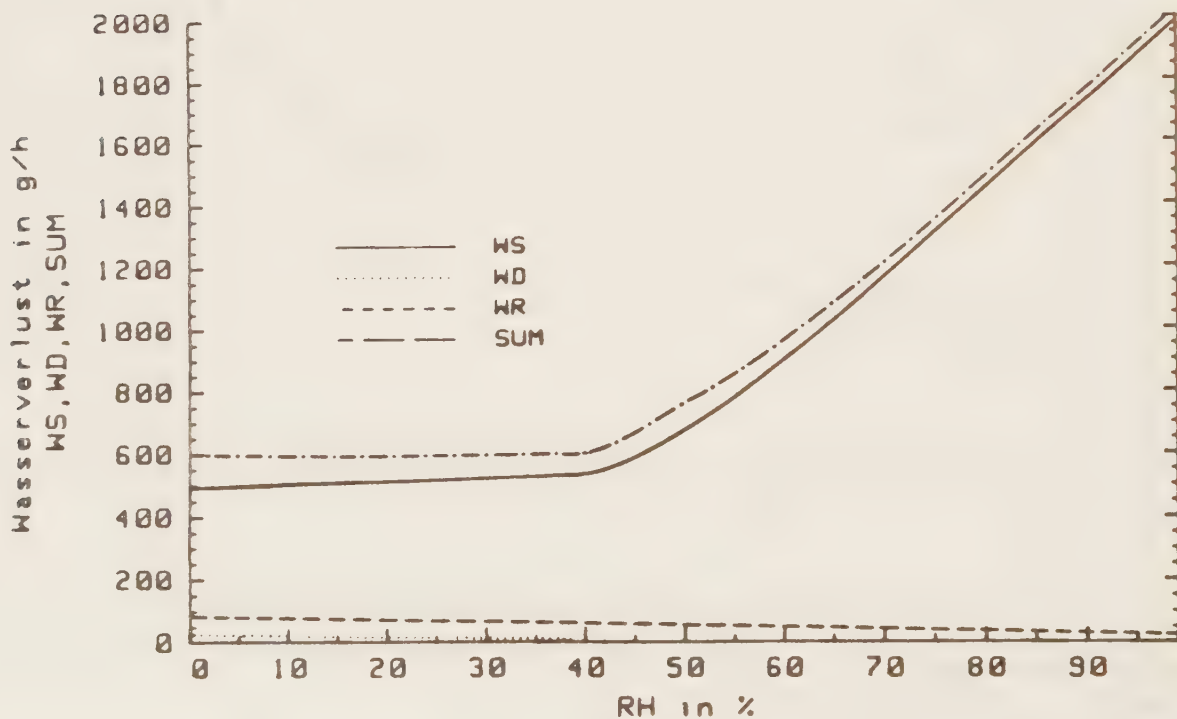


Abb.25: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH am Beispiel einer hart arbeitenden Frau ($M=459\text{ W}$); $T_a=T_{\text{mrt}}=30^{\circ}\text{C}$, $v=0,5\text{ m/s}$.

ist trotz der Tatsache, daß Frauen bei gleichen Körpertemperaturen weniger Schweiß produzieren als Männer, durch die hier vorliegende höhere Kern- und Hauttemperaturen zu erklären, die sich wegen der höheren spezifischen metabolischen Rate (in W/m^2) einstellen.

Hält man dagegen die spezifische metabolische Rate konstant und vergleicht dann die Schweißproduktion des Mannes und der Frau (Abb.20), so liegt die Schweißproduktion der Frau unter der des Mannes.

Bei der hohen Lufttemperatur von $T_a=30^\circ\text{C}$ und einer hohen relativen Feuchte werden beim Mann und der Frau (Abb.22 u. 25) die per definitionem angenommenen physiologischen Grenzen der Transpiration erreicht, die jedoch bei Frauen etwas tiefer als bei Männern liegen könnten.

Die Wasserdampfdiffusion WD von Mann und Frau erreicht in den Abbildungen 23 und 24 die annähernd gleichen Werte, da bei der Frau einer kleineren Körperoberfläche höhere Hauttemperaturen entgegenstehen.

Die sich aus den Berechnungen zu den Abbildungen 19-26 ergebenden Wärmeflüsse und Körpertemperaturen sind im Anhang in den Tabellen 1-8 aufgelistet.

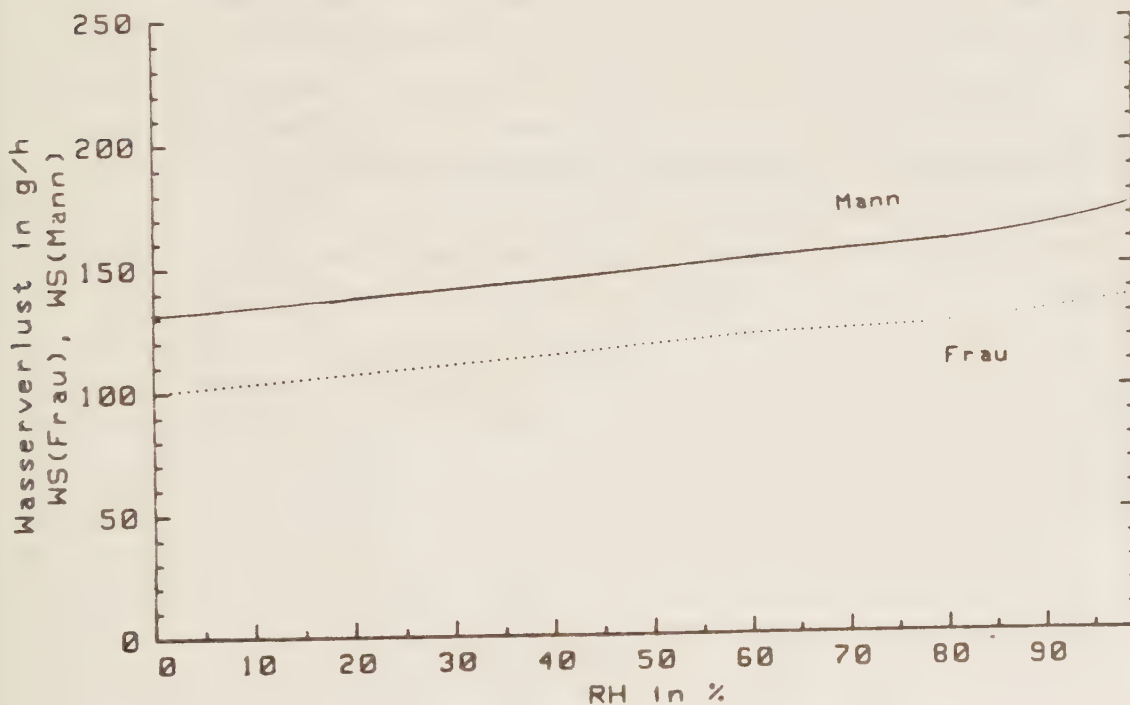


Abb.26: Vergleich der Schweißproduktion WS eines Mannes und einer Frau bei gleicher spezifischer metabolischer Rate in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH; $T_a = T_{mrt} = 20^\circ\text{C}$, $v=0,5\text{ m/s}$.

Um das beschriebene Rechenverfahren an experimentell gefundenen Daten zu prüfen, wurden vergleichende Berechnungen des Gesamtwasserverlustes von 5 Testpersonen, die an einer Klimakammerstudie (Krapp, 1982) teilnahmen, durchgeführt. In dieser Studie sollte unter anderem der Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf den Wasserverlust eines Menschen bei konstanter Luft- und Strahlungstemperatur ($T_a = T_{mrt} = 22^{\circ}\text{C}$) untersucht werden. Als mittlerer Gewichtsverlust der 5 Probanden ergab sich bei leichter Aktivität ein Wert von 56 g/h für eine relative Luftfeuchtigkeit $RH=60\%$ bzw. 73 g/h für $RH=20\%$. In diesem Gewichtsverlust ist neben dem Gesamtwasserverlust SUM noch der sogenannte trockene Gewichtsverlust durch den Metabolismus (Umwandlung $\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$) enthalten, der bei den genannten Aktivitäten ca. 3 g/h beträgt.

Die nach dem vorgestellten Modell berechneten Mittelwerte des Gesamtwasserverlustes SUM der 5 Personen betragen 45 g/h bzw. 56 g/h. Die berechneten Werte liegen danach um 14% bzw. 20% niedriger als die gemessenen. Dies kann zum einen an einer Unterschätzung des Arbeitsumsatzes liegen, der bei den Berechnungen zu 50 W angesetzt wurde - zum anderen aber auch an der Wägegenauigkeit von 10 g der bei den Experimenten benutzten Waage. Außerdem ist bei diesem Vergleich zu bedenken, daß nach den Berechnungen bei den herrschenden Klimabedingungen und Aktivitäten keine Schweißproduktion auftritt, und sich daher der Gesamtwasserverlust nur aus der Perspiratio insensibilis und dem respiratorischen Wasserverlust zusammensetzt. Zusätzliche experimentelle Untersuchungen bei höheren Aktivitäten wären daher sehr nützlich, um die Modellrechnungen zu verifizieren, oder notwendige Verbesserungen zu ermöglichen.

6 Energiebilanz und Behaglichkeit

Das im Kapitel 3.3 beschriebene Rechenverfahren ermöglicht die Quantifizierung der Terme der Energiebilanzgleichung und der sie steuernden physiologischen Größen für einen definierten Menschen in einer definierten Umgebung. Die Wertung der berechneten Größen in Bezug auf das thermische Befinden eines Menschen, ist ein in der Literatur vieldiskutiertes Problem.

Schon allein die Definition der Begriffe "thermischer Komfort" oder "Behaglichkeit" ist oft sehr widersprüchlich. Die wohl allgemeinste Definition des thermischen Komforts wird von ASHRAE (1966) gegeben. Danach ist thermischer Komfort ein "Sinneszustand, der Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung ausdrückt". Diese Definition enthält keine Aussage über die für den genannten Sinneszustand günstigen physiologischen Größen.

Nach Monteith (1978) ist der thermische Komfort dann gegeben, wenn die metabolische Rate M bei einer bestimmten Aktivität ihr Minimum hat; wenn also weder eine Erhöhung durch die Transpiration und die gesteigerte Blutzirkulation bei Hitzestress, noch eine Erhöhung durch Zittern bei Kältestress erforderlich sind.

Eine mehr physikalische Definition des Komfortbereiches ist die nach Fanger (1972). Danach ist die erste Voraussetzung für Behaglichkeit die Erfüllung der Energiebilanzgleichung ohne Speicherung von thermischer Energie ($S=0$). Als weitere Voraussetzung wird angegeben, daß die Schweißrate SW und die mittlere Hauttemperatur T_{sk} in einer bestimmten Größenordnung liegen müssen. Der Mensch muß folglich in der Lage sein, seine Energiebilanz auszugleichen, ohne die Hauttemperatur oder die Schweißrate so zu verändern, daß er diese als unangenehm oder als Belastung empfindet.

Zusätzlich dürfen keine übermäßigen lokalen Unterschiede der Körperparameter, wie z.B. durch ein stark asymmetrisches Strahlungsfeld verursacht, auftreten. Auch sind sicher bei der Bewertung der Behaglichkeit sehr lokal begrenzte Singularitäten, wie z.B. kalte Füße, ein Luftzug in der Nackengegend, oder ein ungünstiger vertikaler Gradient der Lufttemperatur (Fanger, 1978) Ursachen, die zu einer Befindensverschlechterung führen können.

Nach Azer et al. (1977) ist der Benetzungsgrad b der Hautoberfläche ein Maß für den Diskomfort. Der Benetzungsgrad b wird vor allem bei schlechten Austauschbedingungen für Wasserdampf (hohes e_1 , kleines v) bedeutend für die Behaglichkeit.

Nach Wenzel et al. (1980) kann auch die Herzfrequenz als Maß für die thermische Belastung bei zu warmen Umgebungsbedingungen angesehen werden. Da sie jedoch sehr große individuelle Unterschiede aufweist und hauptsächlich von der Aktivitätsstufe gesteuert wird, soll diese Größe hier nicht weiter in die Bewertung des thermischen Milieus einbezogen werden.

Bei der Behaglichkeitsbewertung der thermischen Umgebung eines Individuums sind auch persönliche Gewohnheiten und damit verbundene Akklimatisationsprozesse zu berücksichtigen. Ein Mensch, der gewohnt ist sich in kühler Umgebung aufzuhalten, wird sich in der Regel bei etwas kälteren Umgebungsbedingungen wohlfühlen, als ein Mensch, der sich die meiste Zeit in wärmeren Klimabedingungen aufhält. Dieser Effekt äußert sich auch in saisonalen Unterschieden.

Nach Auliciems (1981) werden im allgemeinen im Winter etwas geringere Lufttemperaturen als behaglich empfunden als im Sommer. Die Berücksichtigung dieses saisonalen Akklimatisationsprozesses bei der Klimatisierung von Räumen, könnte zu erheblichen Energieeinsparungen führen. Nach Auliciems (1981) ist jedoch die mathematische Formulierung der Akklimatisationsprozesse mit den vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen noch nicht in sinnvoller Weise möglich.

Zu diesen Schwierigkeiten bei der Beurteilung der thermischen Behaglichkeit kommt oftmals hinzu, daß die psychische Gemütslage eines Menschen für das Gesamtfinden oft bedeutender ist als die thermische Behaglichkeit. Thermische Behaglichkeit ist nach Cabanac (1981) ein eher psychisches, vom Nervensystem gesteuertes Phänomen. Dies zeigte sich auch bei einer Umfrage unter Straßenpassanten an einem heißen Sommertag in der Münchener Ludwigstraße. An dem Befragungstag mit wolkenlosem Himmel und $T_a = 30^\circ\text{C}$ lag eine Straßenseite im Schatten, die gegenüberliegende war besonnt. Objektiv gesehen müßte die besonnte Straßenseite thermisch sehr belastend, die beschattete dagegen weniger belastend bis thermisch angenehm bewertet werden. Diese Unterschiede wurden durch die Umfrage, in der nach der aktuellen thermischen Behaglichkeit gefragt wurde, nicht widergegeben. Die Mehrzahl der Passanten fühlte sich auf beiden Straßenseiten "thermisch sehr behaglich". Ein weiteres Nachfragen nach dem vermeintlichen Grund für diese positive Aussage ergab, daß vor allem das schöne Wetter und der Sonnenschein die positive Einschätzung der thermischen Umgebung beeinflusste. Diese psychische Komponente, die auch durch persönliche Erlebnisse vor

einer Befragung geprägt sein kann, ist daher ein wichtiger Bestandteil des Komforts. Sie kann aber im Rahmen einer physikalischen Arbeit nicht untersucht und gewertet werden.

Eine Möglichkeit eines physikalischen Bewertungsverfahrens des thermischen Komforts erfolgt über die Berechnung einer fiktiven thermischen Belastung ($S=0$) aus der Energiebilanzgleichung bei vorgegebener Hauttemperatur (Sibbons, 1966) oder bei einer von den Umgebungsbedingungen unabhängigen Hauttemperatur und Schweißrate (Fanger, 1972), wie sie im Fall der Behaglichkeit vorlägen (siehe 3.3).

Hier soll jedoch ein Bewertungsverfahren vorgeschlagen werden, das die wirklichen Werte der mittleren Hauttemperatur, der Schweißrate und des Benetzungsgrades berücksichtigt.

Das im folgenden erläuterte Bewertungsverfahren ist den herkömmlichen Kriterien wie z.B. der Äquivalenttemperatur, der Effektivtemperatur u. ä. überlegen, da neben allen bedeutenden meteorologischen Parametern auch körpereigene Größen berücksichtigt werden.

Winslow et al. (1949) fanden experimentell, daß bei Hauttemperaturen $T_{sk} < 29^{\circ}\text{C}$ und $T_{sk} > 35^{\circ}\text{C}$ thermische Unbehaglichkeit bei den Probanden vorlag. Hardy (1961) und Nishi et al. (1969) legten den Komfortbereich auf Hauttemperaturen um 33°C fest, Sibbons (1966) präziserte diesen Wert auf $33,3^{\circ}\text{C}$. Nach Fanger (1972) sind die mittleren Hauttemperaturen bei Behaglichkeit eine Funktion der inneren Wärme H und liegen z.B. für $H=58 \text{ W/m}^2$ bei 34°C und für $H=174 \text{ W/m}^2$ bei 31°C .

Nach Chatonnet et al. (1965) hat die Kerntemperatur T_c einen größeren Einfluß auf die thermische Behaglichkeit als die Hauttemperatur. Im zu warmen thermischen Bereich kann dieser Effekt durch die Schweißrate, die vor allem eine Funktion von T_c ist, berücksichtigt werden. Nach Fanger (1972) ist die Schweißrate SW im Komfortbereich eine Funktion der inneren Wärme H in Form der Zahlenwertgleichung (112):

$$SW = 0,63 \cdot A_{Du} \cdot (H/A_{Du} - 58) \quad (\text{in g/h}) \quad (112).$$

Aus (112) ergibt sich z.B. für eine innere Wärme $H=200 \text{ W}$ und eine Oberfläche von $A_{Du} = 2,0 \text{ m}^2$ eine Schweißrate von $SW=53 \text{ g/h}$.

Ein anderes Maß, das die Transpiration beschreibt, ist der Benetzungsgrad. Durch ihn kann ein unkomfortables Gefühl bei starker Benetzung der Haut, das oft mit den Ausdrücken "klamm", "klebrig", "dämpfig" u.ä.

beschrieben wird, quantifiziert werden. Dieses Gefühl wird nicht ausschließlich durch thermischen Stress, sondern auch durch persönliche Unzufriedenheit mit der körperlichen hygienischen Situation verursacht. Der Benetzungsgrad könnte daher ein gutes Maß für das Schwüleempfinden sein.

Gagge et al. (1969) schlagen als Grenze der Behaglichkeit einen Benetzungsgrad b von 25% vor. Ein Benetzungsgrad b 25% könnte danach Unbehaglichkeit auslösen.

Da alle der genannten Behaglichkeitskriterien per se Diskomfort auslösen können, wird folgendes Bewertungsverfahren vorgeschlagen. Danach ist thermischer Diskomfort wahrscheinlich, wenn eines der folgenden Kriterien erfüllt ist:

1. $T_{sk} < 29^{\circ}\text{C}$,
2. $T_{sk} > 35^{\circ}\text{C}$,
3. $SW > 0,63 A_{Du} (H/A_{Du} - 58) 1,5$
4. $b > 25\%$.

Die von Fanger (1972) angegebene mittlere Schweißrate für Komfortbedingungen, die dem Kriterium 3 zugrunde liegt, gibt das Optimum für eine bestimmte innere Wärme H an. Bei nicht zu großen Abweichungen von diesem Wert wird deshalb immer noch thermischer Komfort gegeben sein. Als Kriterium für wahrscheinlichen Diskomfort wurde daher das Überschreiten der Schweißrate SW bei thermischer Behaglichkeit um 50% (Faktor 1,5) angesetzt.

Bei der Diskussion spezieller Klimabedingungen und deren Einfluß auf die Terme der menschlichen Energie- und Wasserbilanzgleichung in Kapitel 7 wird jeweils eine Komfortbewertung nach den Bedingungen 1-4 durchgeführt. Dazu sind in den Abbildungen, in denen die mittleren Hauttemperaturen oder die Hautbenetzungsgrade aufgetragen sind, jeweils die Behaglichkeitsgrenzen (29°C und 35°C bzw. 25%) mit dicken durchgezogenen Geraden eingezeichnet.

Die Bewertung des thermischen Komforts bezieht sich immer auf das Befinden eines Menschen. Es kann sich in manchen Fällen, vor allem bei Veränderungen der thermischen Umgebung, vom thermischen Empfinden unterscheiden. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden.

Wenn sich ein Mensch nach einem Saunagang durch ein kaltes Tauchbad Abkühlung verschafft, so wird er seine thermische Umgebung (kaltes Wasser) als sehr kalt empfinden, während sein Befinden kurzzeitig thermisch komfortabel sein kann.

7 Der Mensch in verschiedenartigen Klimaten

In den folgenden Abschnitten, werden für verschiedenartigste Umgebungsbedingungen Berechnungen der Wärmeflüsse und der thermophysiologischen Parameter (nach Gleichung (105)) für 4 verschiedene Personen durchgeführt und die Ergebnisse diskutiert.

Dabei werden die sich im stationären Zustand einstellenden Haut- (T_{sk}) und Kleidungstemperaturen (T_{cl}) und die Schweißrate (SW) am Beispiel von 4 Individuen, weiblich und männlich, jeweils im Alter von 20 bzw. 60 Jahren, berechnet. Diese 4 Individuen wurden ausgewählt um alters- und geschlechtsspezifische Unterschiede sichtbar zu machen. Die Körpermaße der Frauen sind dabei 1,65 m - 60 kg und die der Männer 1,80 m - 75 kg. Die in die Berechnungen eingehenden personenbezogenen Daten der Personen 1 - 4 sind in der Tabelle 16 noch einmal zusammengestellt.

Tab.16: Personenbezogene Eingangsgrößen zur Berechnung der Energieflüsse von 4 verschiedenen Individuen

Person	Geschlecht	Alter (a)	Größe (m)	Masse (kg)
1	weiblich	20	1,65	60
2	männlich	20	1,80	75
3	weiblich	60	1,65	60
4	männlich	60	1,80	75

7.1 Der Mensch im Raumklima

Die Mehrzahl der in Mitteleuropa lebenden Menschen hält sich die längste Zeit des Tages in geschlossenen Räumen auf. Daher hat das Raumklima eine große Bedeutung für den Wärmeaustausch und die Behaglichkeit des hier betrachteten Mitteleuropäers.

Das Raumklima unterscheidet sich im allgemeinen im thermischen Sinne von den Außenklimaten durch geringere Windgeschwindigkeiten, ausgeglichene Lufttemperaturen, geringere kurzweilige Einstrahlung und im Winter durch eine geringere relative Luftfeuchtigkeit. Grundsätzlich

ist das Raumklima in ein durch "Air Conditioning" künstlich eingestelltes Klima und in ein aus baulichen Maßnahmen resultierendes (mit Heizmöglichkeit) zu differenzieren.

In einem voll klimatisierten Raum wird man ein sehr konstantes Klima, vor allem in Bezug auf die Lufttemperatur, die über einen Thermostaten zur Hauptsteuergröße der üblichen Klimaanlage wird, erwarten können. Gerade aber diese Konstanz der Lufttemperatur wird in der neueren wissenschaftlichen Literatur (z.B. Haider, 1974) als Ursache für Ermüdungserscheinungen angesehen. Die Steuerung der Lufttemperatur erfolgt über ein Umluftsystem, das je nach Bedarf erwärmte oder gekühlte Luft in den Raum bläst und an anderer Stelle Raumluft absaugt. Dadurch können, je nach Auslegung der Anlage, Zugerscheinungen und Infrasschall entstehen. Vor allem der Infrasschall scheint bei vielen Personen, die sich in einem klimatisierten Raum aufhalten, Befindensverschlechterungen hervorzurufen (Kröhling et al., 1982). Dazu kommt noch der psychische Effekt eines Gefühls des "Abgeschlossenenseins" und des "Ausgeliefertseins" der künstlich geschaffenen und nicht beeinflussbaren thermischen Umgebung.

So verwundert es nicht, daß z.B. Kröhling und Dirnagl (1982) bei Befragungen von Beschäftigten in vollklimatisierten und nicht künstlich klimatisierten Bibliotheken eine signifikant höhere Anzahl von Befindensbeeinträchtigungen in den klimatisierten Räumen fanden. Sicher ist dabei die Unzufriedenheit mit der thermischen Umgebung, die auch durch individuell unterschiedliche Erwartungen geprägt ist, nur ein Teilaspekt. Solange jedoch Klimaanlage installiert werden, die so bedeutende Parameter wie die mittlere Strahlungstemperatur, den Dampfdruck oder auch die Windgeschwindigkeit unberücksichtigt lassen, müssen auch im thermischen Bereich Unzulänglichkeiten auftreten.

Um diese zu Quantifizieren wird im folgenden der Einfluß der meteorologischen Parameter des Raumklimas auf die Energetik von sich im Raum aufhaltenden Personen berechnet und diskutiert. Dabei wird der effektive Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung für die weiblichen Personen mit $I_{cl}=0,8$ clo und für die Männer mit $I_{cl}=1,0$ clo angesetzt. Dies sind nach Sprague et al. (1974) plausible Werte für übliche Bekleidung im Raumklima. Als Aktivitäten wurden in den Beispielrechnungen ruhiges Sitzen auf einem Stuhl (AKT=25 W) und allgemeine Büroarbeit (AKT=110 W) angenommen.

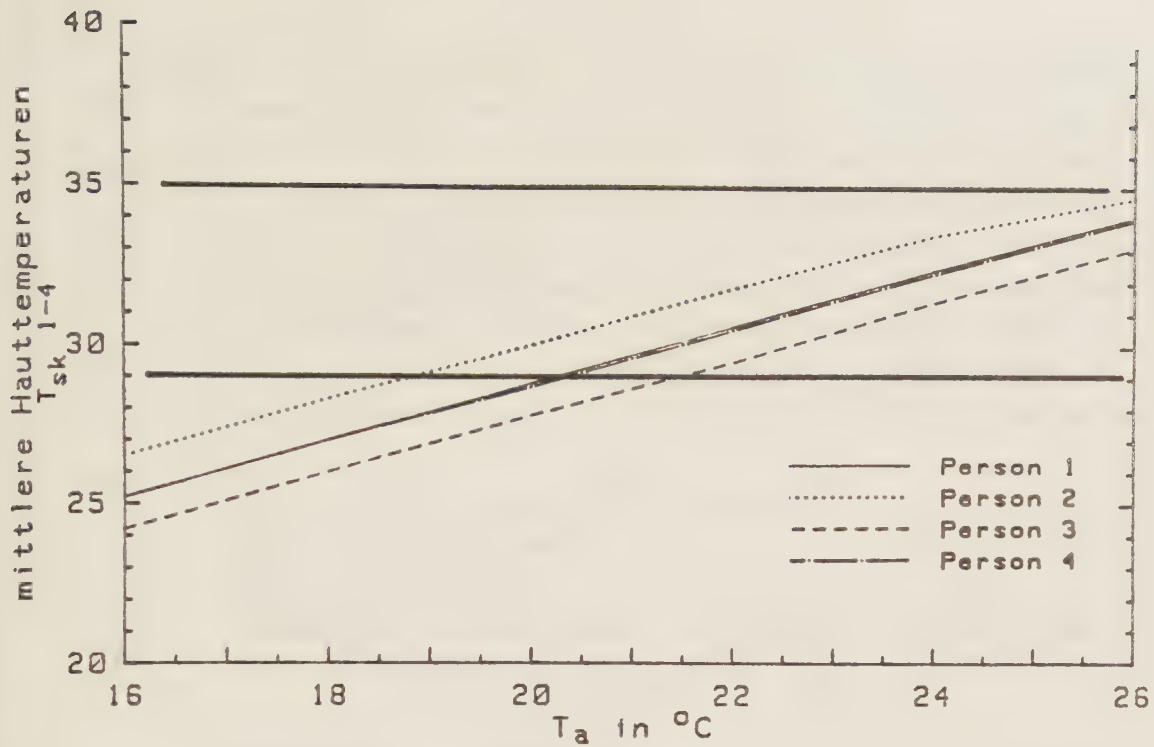


Abb.27: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a ($T_{mrt}=T_a$, RH=50%, $v=0,1$ m/s) bei ruhigem Sitzen (AKT=25 W) im Raumklima.

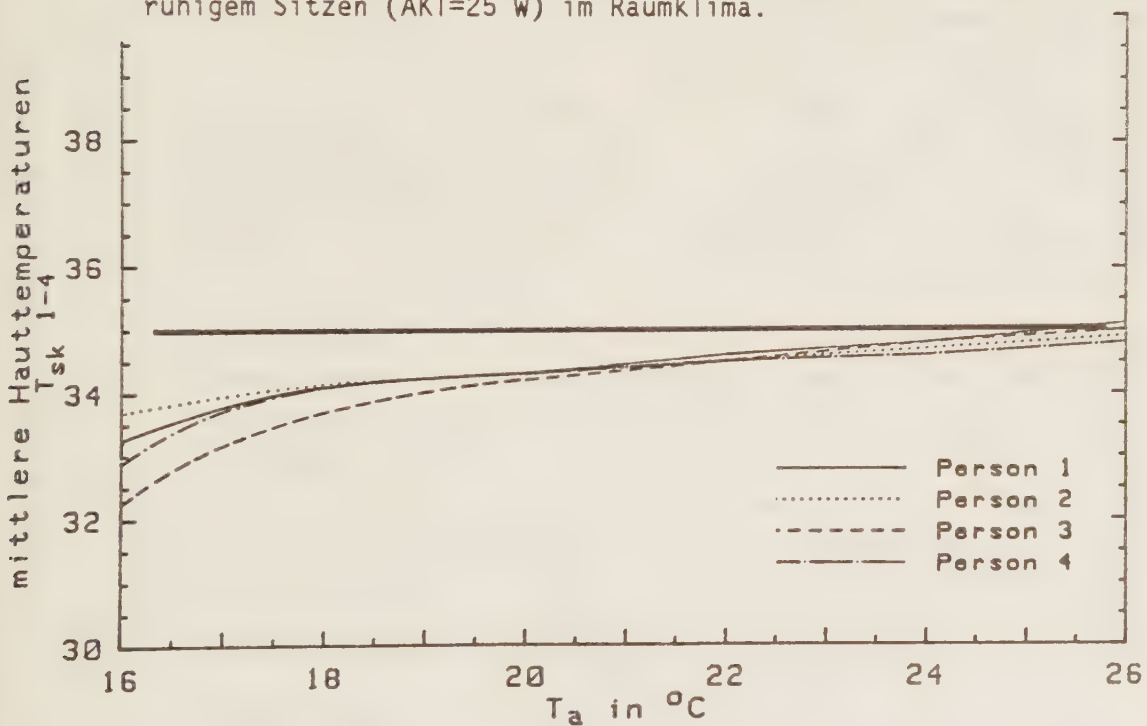


Abb.28: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a ($T_{mrt}=T_a$, RH=50%, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.

Für die in 7 näher charakterisierten Personen ist der Einfluß der Lufttemperatur im Bereich von 16°C - 26°C auf die mittleren Hauttemperaturen und die Schweißraten in den Abbildungen 27 bis 29 dargestellt. Die Behaglichkeitsgrenzen sind darin mit roten Linien gekennzeichnet. Bei den Berechnungen dazu wurde die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} jeweils der Lufttemperatur T_a gleichgesetzt und konstante relative Luftfeuchtigkeit $\text{RH}=50\%$ und Windgeschwindigkeit $v=0,1 \text{ m/s}$ angenommen. Alle anderen berechneten Größen, wie Kern- und Bekleidungstemperaturen und die einzelnen Wärmeflüsse sind im Anhang in Tabelle 9 zusammengestellt.

Vergleicht man die sich bei variierender Lufttemperatur T_a einstellenden mittleren Hauttemperaturen T_{sk} der 4 betrachteten Personen (Abbildung 27), so zeigt sich im untersuchten Temperaturintervall bei allen ein nahezu linearer Anstieg. Die mittlere Hauttemperatur des jungen Mannes (Pers. 2) liegt dabei immer am höchsten, während die der älteren Frau (Pers. 3) am niedrigsten liegt. Dieser Unterschied, der hier mehr als 2 K beträgt, resultiert aus den unterschiedlichen Grundumsätzen. Die Wahrscheinlichkeit eines Diskomforts aufgrund einer zu kalten Umgebung ist bei allen Personen noch bei einer Lufttemperatur $T_a=18^{\circ}\text{C}$ gegeben. Bei steigenden Lufttemperaturen wird sich der junge Mann zuerst im thermischen Komfort befinden (bei $T_a=19^{\circ}\text{C}$), der dann im untersuchten Intervall nicht mehr verlassen wird.

Deutlich andere Verhältnisse liegen bei der höheren Aktivität (Büroarbeit), dargestellt in Abbildung 28, vor. Bei Lufttemperaturen T_a 20°C liegen die mittleren Hauttemperaturen der einzelnen Personen sehr nahe zusammen, was durch die Schweißverdunstung zu erklären ist, die nun eingesetzt hat (Abb.29) und die eine weitere Erhöhung von T_{sk} dämpft.

Bei Lufttemperaturen $T_a=20^{\circ}\text{C}$ weist die junge Frau (Pers.1) aufgrund der geringeren Schweißproduktion die höchste mittlere Hauttemperatur aller Personen auf. Dies wird bei der Betrachtung von Abbildung 29 anschaulich, aus der hervorgeht, daß der Unterschied der Schweißproduktion zwischen Person 1 und 2 von weniger als 10 g/h bis auf 26 g/h anwächst. Person 3 hat nach Abbildung 29 die geringste Schweißrate. Erreicht die Schweißrate bei Büroarbeit und $T_a=26^{\circ}\text{C}$ bis zu 138 g/h, so ist sie bei ruhigem Sitzen vernachlässigbar gering. Nur der junge Mann produziert in dieser Situation überhaupt Schweiß.

Betrachtet man die Komfortbedingungen in Abbildung 28, so zeigt sich, daß bis zu $T_a \leq 22^{\circ}\text{C}$ thermischer Komfort wahrscheinlich ist, und daß bei höheren Lufttemperaturen eine thermische Belastung erwartet werden muß.

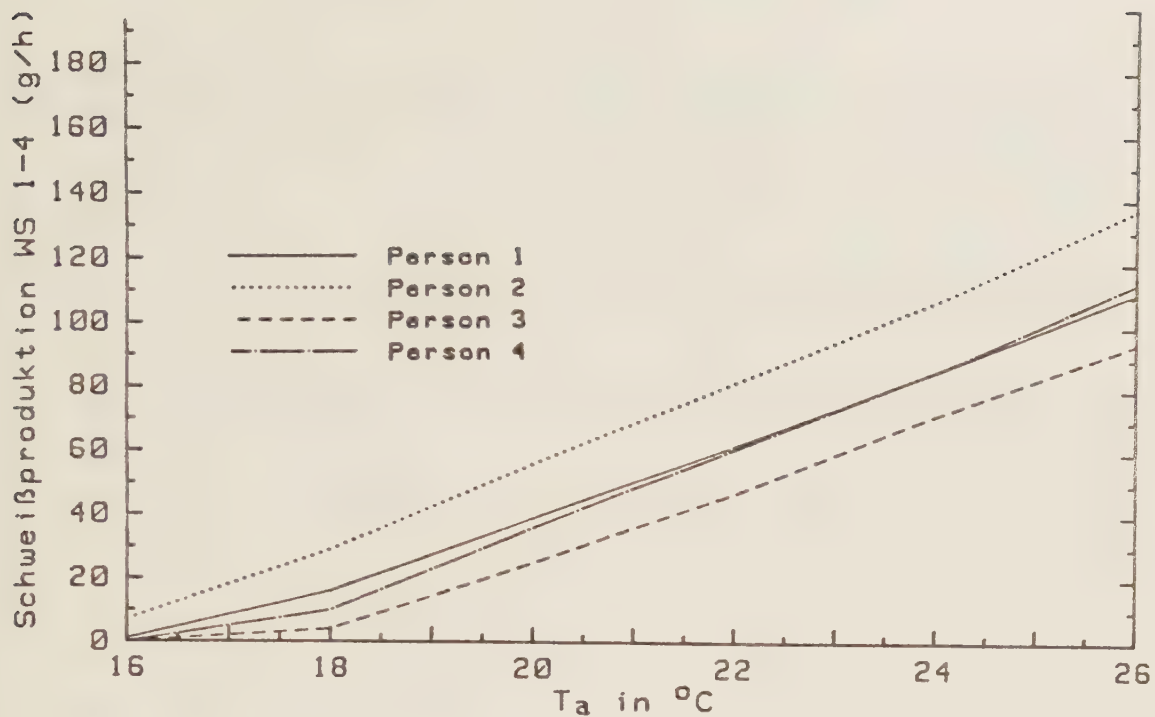


Abb.29: Schweißraten WS von 4 Personen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a ($T_{mrt}=T_a$, $RH=50\%$, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.

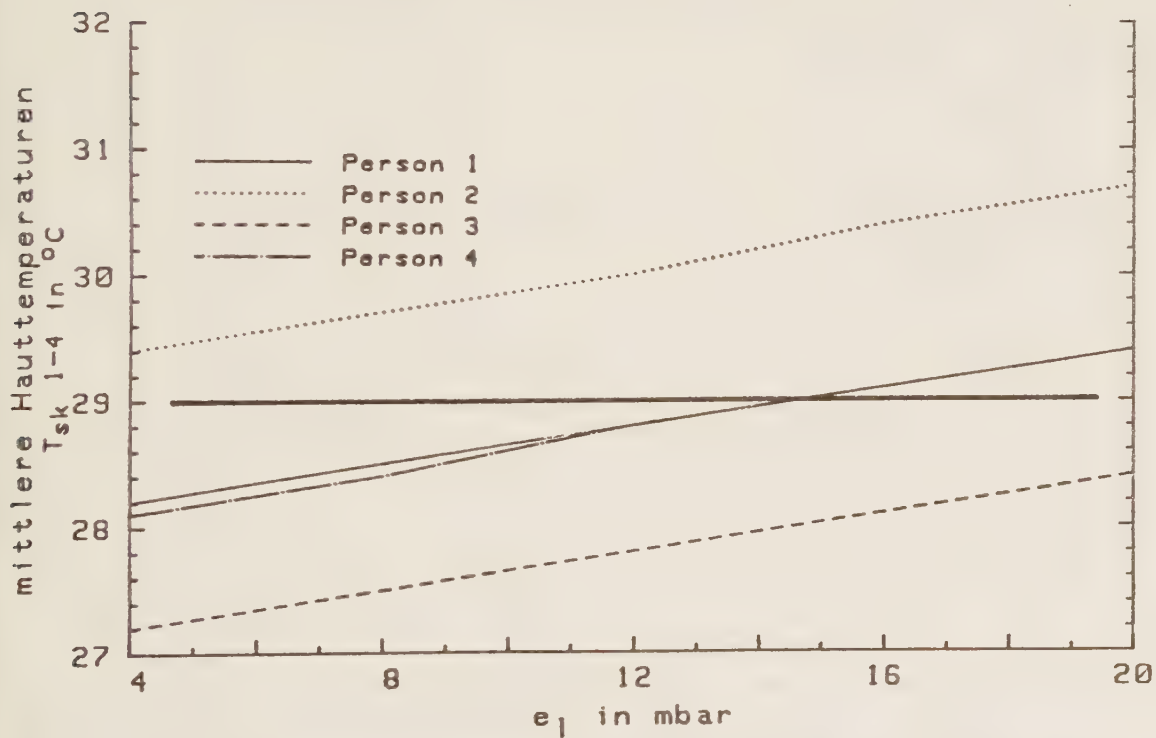


Abb.30: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit vom Dampfdruck e_1 ($T_a=T_{mrt}=20^\circ\text{C}$, $v=0,1$ m/s) bei ruhigem Sitzen (AKT=25 W) im Raumklima.

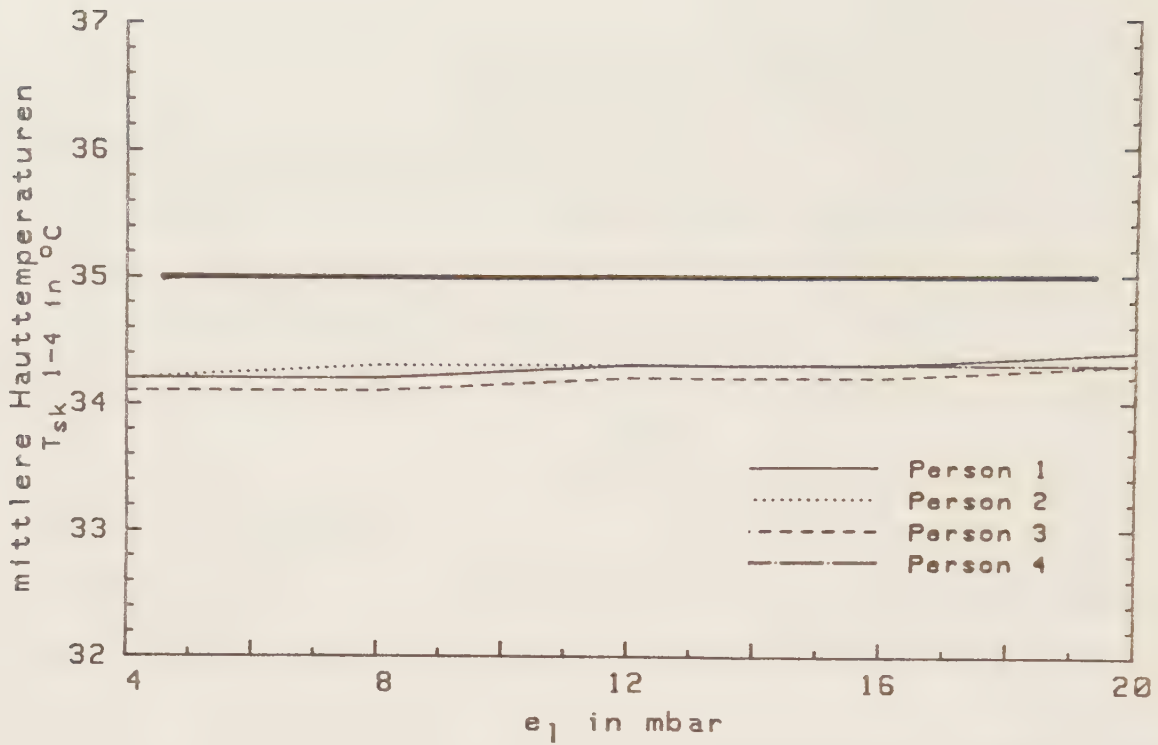


Abb.31: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit vom Dampfdruck e_1 ($T_a=T_{mrt}=20^\circ\text{C}$, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.

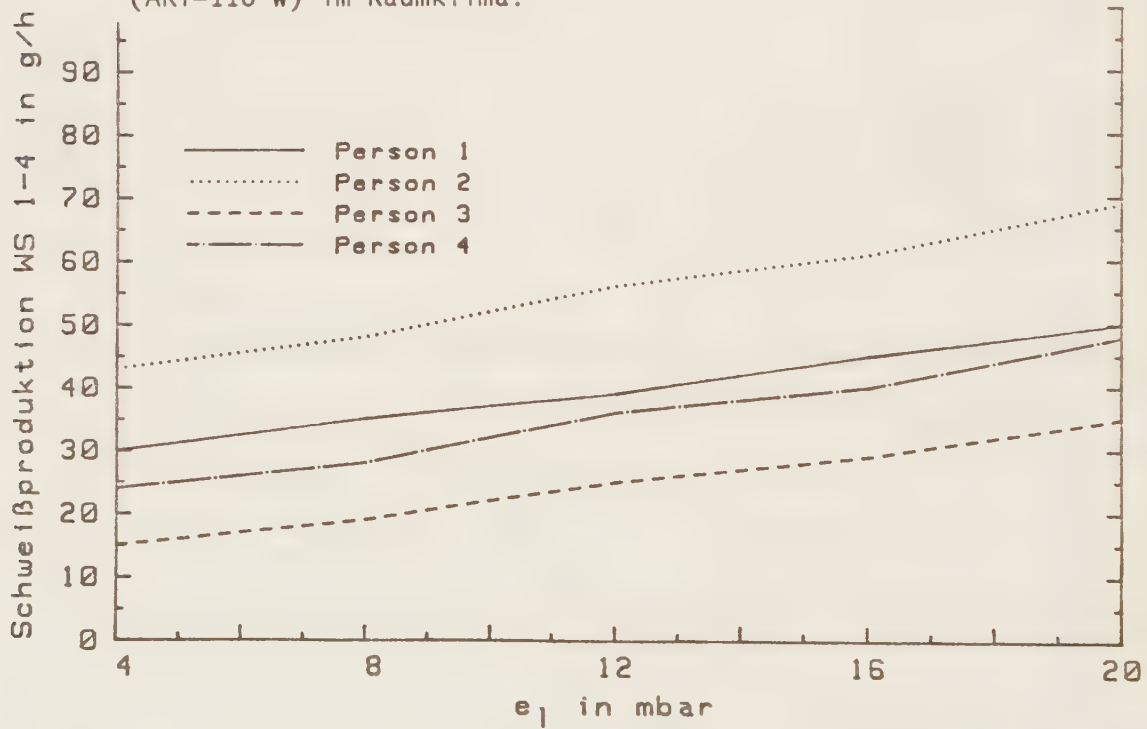


Abb.32: Schweißraten WS von 4 Personen in Abhängigkeit vom Dampfdruck e_1 ($T_a=T_{mrt}=20^\circ\text{C}$, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.

Die Abhängigkeit der mittleren Hauttemperaturen und der Schweißraten von der Luftfeuchtigkeit der Raumluft in Form des Dampfdruckes e_1 ist in den Abbildungen 30 bis 32 dargestellt. Den Berechnungen zu diesen Abbildungen liegt eine Lufttemperatur von $T_a=20^{\circ}\text{C}$, eine Strahlungstemperatur $T_{\text{mrt}}=20^{\circ}\text{C}$ und eine Windgeschwindigkeit $v=0,1 \text{ m/s}$ zugrunde. Das dargestellte Dampfdruckintervall entspricht einem Intervall der relativen Luftfeuchtigkeit RH von ca. 20-85%.

Die zu den Abbildungen 30-32 gehörigen Wärmeflüsse sind im Anhang in der Tabelle 10 aufgelistet.

Eine Steigerung des Dampfdruckes e_1 von 4 auf 20 mbar wirkt sich nach Abbildung 30 in einer Steigerung der mittleren Hauttemperaturen um ca. 1,3 K bei ruhigem Sitzen und um ca. 0,2 K bei Büroarbeit aus (Abb.31). Die Schweißproduktion bei Büroarbeit steigt dabei (Abb.32) für alle Personen um ca. 20 g/h an. Bei ruhigem Sitzen (Abb.30) ist die Komfortbewertung für den jungen Mann (Pers.2) im gesamten Feuchtebereich neutral, während sie für die ältere Frau (Pers.3) immer "zu kühl" ist.

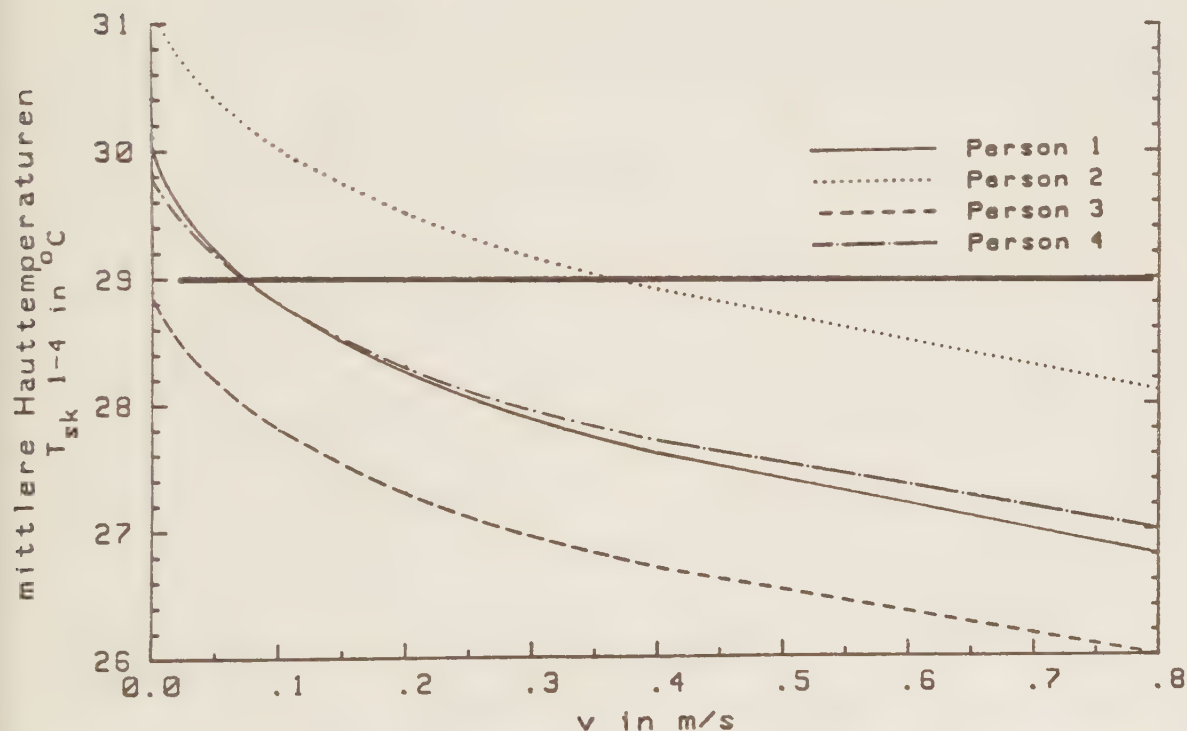


Abb.33: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v ($T_a=T_{\text{mrt}}=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12 \text{ mb}$) bei ruhigem Sitzen (AKT=25 W) im Raumklima.

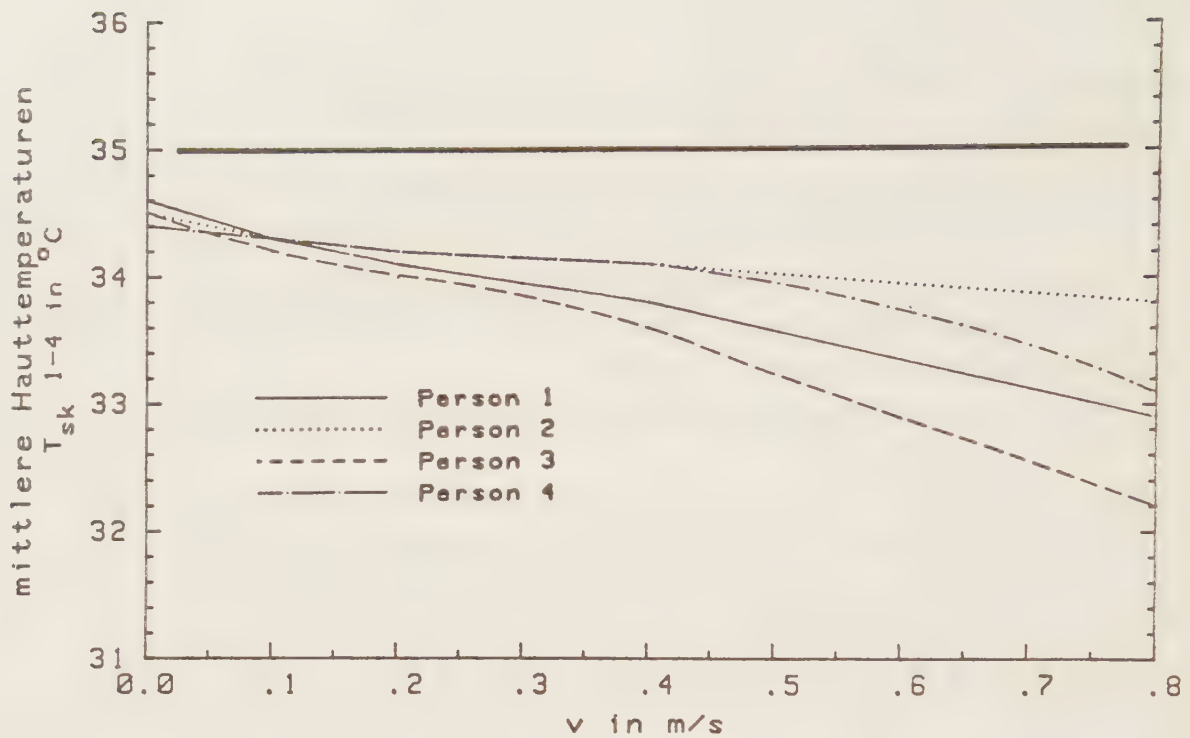


Abb.34: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v ($T_a=T_{mrt}=20^{\circ}\text{C}$; $e_1=12$ mb) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.

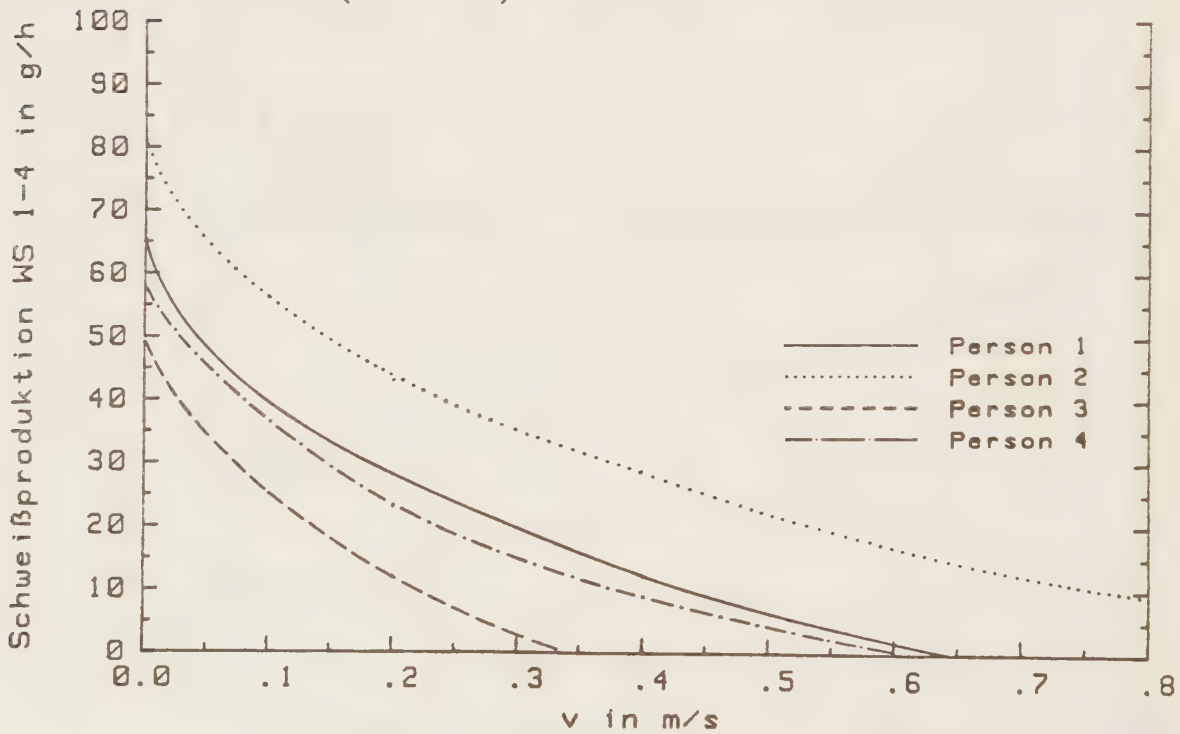


Abb.35: Schweißraten WS von 4 Personen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v ($T_a=T_{mrt}=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12$ mb) bei Büroarbeit (AKT= 110 W) im Raumklima.

Für die Personen 1 und 4 ergeben sich erst bei $e_1=15$ mb neutrale thermische Bewertungen. Bei Büroarbeit ist die thermische Bewertung für alle Personen im gesamten Feuchtigkeitsbereich "neutral". Die Abbildungen 30-32 lassen den Schluß zu, daß wie auch Frank (1975) anführte, der Luftfeuchtigkeit im Raumklima keine sehr große thermophysiologische Bedeutung zukommt.

Ein weiterer meteorologischer Parameter des Raumklimas ist die Windgeschwindigkeit v , die in der Regel je nach Heizungs- oder Lüftungsart durch thermische Konvektion verursacht wird. Sie liegt i.a. unter 0,5 m/s, meistens sogar unter 0,1 m/s. Ihr Einfluß auf die mittleren Hauttemperaturen T_{sk} und die Schweißraten der 4 Testpersonen bei sonst konstanten Bedingungen ($T_a=T_{mrt}=20^\circ\text{C}$, $RH=50\%$, $e_1=12$ mb) ist in den Abbildungen 33-35 dargestellt. Die dazugehörigen Wärmeflüsse sind im Anhang in Tabelle 11 aufgelistet.

Steigende Windgeschwindigkeiten führen vor allem durch die Vergrößerung des Flusses fühlbarer Wärme zu tieferen Hauttemperaturen. Bei den ruhig sitzenden Personen, deren Haut annähernd trocken ist, fällt daher die mittlere Hauttemperatur im Bereich 0,0 v 0,1 m/s am stärksten ab (Abb.33). Bei der Büroarbeit, bei der bei $v=0,0$ m/s Benetzungsgrade der Haut von ca. 25% vorliegen, übt die feuchte Oberfläche einen dämpfenden Einfluß auf Temperaturänderungen aus. Erst bei höheren Windgeschwindigkeiten, wenn durch eine geringere Schweißproduktion und höhere potentielle Schweißverdunstung der Benetzungsgrad in der Nähe von 0% liegt, steigt der Windeinfluß auf die mittleren Hauttemperaturen. In beiden Fällen reagiert die junge Frau (Pers.1) sensibler auf Änderungen von v als der ältere Mann (Pers.4). Bei ruhigem Sitzen sinkt die mittlere Hauttemperatur der Person 1 im Intervall 0,0 v 0,8 um 3,3 K und T_{sk} der Person 4 dabei nur um 2,8 K.

Die Schweißrate, die wiederum nur für die Aktivitätsstufe "Büroarbeit" von Bedeutung ist, weist den größten Abfall bei kleinen Windgeschwindigkeiten auf, und erreicht mit Ausnahme von Person 2 bei $v=0,8$ m/s den Wert 0. Bei der älteren Frau (Pers.3) wird schon bei $v=0,4$ m/s kein Schweiß mehr produziert.

Ein besonderes und oft nicht beachtetes Problem stellt die Quantifizierung des Einflusses der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} auf die Energetik eines Menschen im Raumklima dar. Messungen der Strahlungstemperaturen der einzelnen Begrenzungsflächen eines Raumes über mehrere Tage im Winter hinweg (Mayer, 1982 unveröffentlicht) ergaben, daß

die Strahlungstemperaturen aller Begrenzungsflächen bis auf wenige Ausnahmen unter der Lufttemperatur lagen. Vor allem die Außenwände und davon speziell die Fensterscheiben wiesen eine bis zu 6 K niedrigere Strahlungstemperatur als die Lufttemperatur auf.

Ein anderes Extrem kann auftreten, wenn durch große Fensterflächen während des Tages solare Strahlung auf einen im Raum befindlichen Menschen fällt. So kann sich die mittlere Strahlungstemperatur für einen direkt durch das Fenster besonnten Menschen bei einer Lufttemperatur T_a und Strahlungstemperatur der anderen Umgebungsflächen von 20°C um 15 K erhöhen. Dieser Berechnung liegen die Annahmen einer 80%-igen Transmission des Fensterglases für solare Strahlung (nach Baldia, 1974), einer Albedo des Menschen von 30%, einer Sonnenhöhe von 45° , einem Raumwinkelanteil der Fensterfläche von 0,1, einer Strahlungsflußdichte der direkten Sonnenstrahlung von 485 W/m^2 und der diffusen Himmelsstrahlung von 236 W/m^2 zugrunde. Entfällt die direkte Sonnenstrahlung, so liegt die mittlere Strahlungstemperatur aufgrund der diffusen Himmelsstrahlung immer noch 3 K über der Lufttemperatur.

Die mittlere Strahlungstemperatur verändert sich jedoch auch, wenn sich in einem Raum viele Menschen befinden, die dann in gegenseitigem Strahlungsaustausch stehen. Deshalb sind nach Frank (1975) in diesen Fällen niedrigere Raumtemperaturen erforderlich, um die gleiche Entwärmung des Körpers zu ermöglichen wie in einem nur mit einer Person besetzten Raum.

In den Abbildungen 36-38 sind die Abhängigkeiten der mittlere Hauttemperaturen T_{sk} und der Schweißraten der 4 Probestpersonen von der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} dargestellt. Die zu den Abbildungen 36-38 führenden Berechnungen wurden mit $T_a=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12 \text{ mb}$ und $v=0,1 \text{ m/s}$ angesetzt.

Steigt in einem Raum bei sonst konstanten Bedingungen die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} , so ist bei ruhigem Sitzen (Abbildung 36) ein annähernd linearer Anstieg der mittleren Hauttemperaturen zu erwarten. Die Abflachung der T_{sk} -Kurve bei $T_{mrt}=30^{\circ}\text{C}$ bei Person 2 ist durch die beginnende Schweißproduktion zu erklären. Bei einem Anstieg der mittleren Strahlungstemperatur von 10°C auf 35°C ergibt sich ein mittlerer Anstieg von T_{sk} um ca. 10 K. Bei Büroarbeit (Abb.37) ist dieser Anstieg wegen der Schweißverdunstung nicht so hoch. Die größten Änderungen sind dabei wegen der noch geringen Schweißproduktion bei $T_{mrt} \leq 20^{\circ}\text{C}$ zu finden.

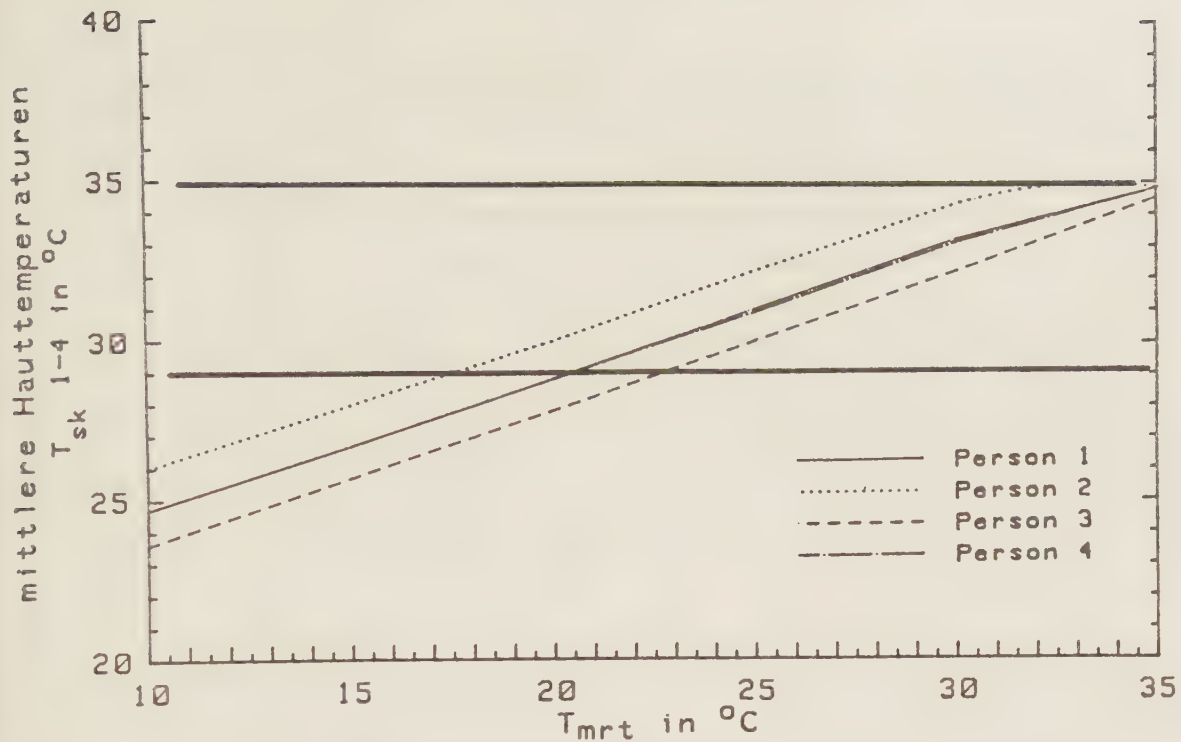


Abb.36: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} ($T_a=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12$ mb, $v=0,1$ m/s) bei ruhigem Sitzen (AKT=25 W) im Raumklima.

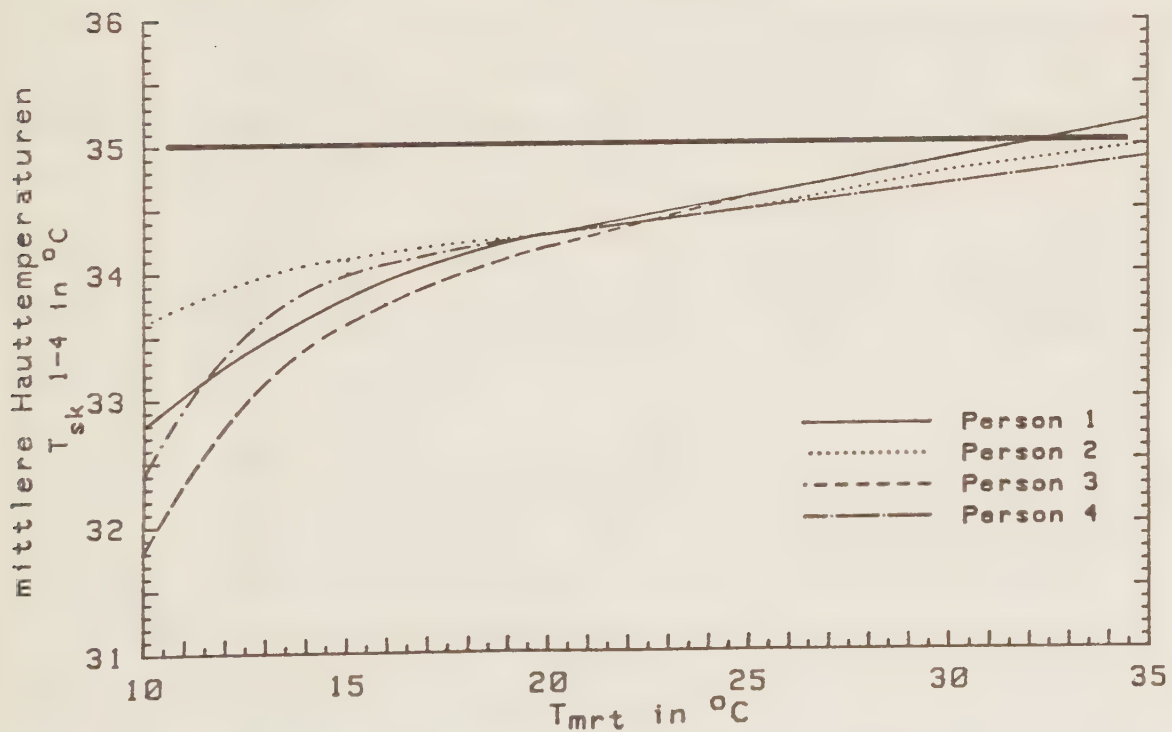


Abb.37: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} ($T_a=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12$ mb, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.

Die größte Sensibilität gegenüber Änderungen der mittleren Strahlungstemperatur weist die ältere Frau (Pers.3) auf, was auf die spät einsetzende und gering bleibende Schweißproduktion (Abb.38) zurückzuführen ist. Bei der Komfortbewertung beim ruhigen Sitzen erreicht zuerst die Person 2 bei $T_a = 17^\circ\text{C}$ den neutralen Zustand, während bei den anderen Personen noch die Bewertung "zu kühl" berechnet wird. Bei mittleren Strahlungstemperaturen $T_{\text{mrt}} = 24^\circ\text{C}$ liegen alle 4 Personen im thermisch neutralen Bereich, der jedoch bei $T_{\text{mrt}} = 35^\circ\text{C}$ von allen Personen mit Ausnahme der Person 3 wieder in Richtung "zu warm" verlassen wird. Bei Büroarbeit berechnen sich bei $T_{\text{mrt}} = 30^\circ\text{C}$ für alle Personen wahrscheinliche thermische Belastungen, während sich diese für Person 2 schon bei $T_{\text{mrt}} = 25^\circ\text{C}$ ergibt.

Eine Gewichtung der Bedeutung von Luft- und mittlerer Strahlungstemperatur kann aus den Abbildungen 27/36 und 28/37 für das hier untersuchte Raumklima durchgeführt werden. Bei einem Vergleich dieser Abbildungen ergibt sich z.B., daß bei Person 1 bei der Lufttemperatur T_a von 20°C und einer mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} von 11°C sich dieselbe Hauttemperatur $T_{\text{sk}} = 25,2^\circ\text{C}$ einstellt, wie bei gleichhohen Luft- und Strahlungstemperaturen $T_a = T_{\text{mrt}} = 16^\circ\text{C}$. Das bedeutet, daß durch gezielte Veränderung der mittleren Strahlungstemperatur um -5 K energetisch betrachtet eine Veränderung der Lufttemperatur um $+4\text{ K}$ kompensiert werden kann. Im untersuchten Klimabereich kann die Erhöhung der Lufttemperatur T_a um 1 K im Mittel über alle 4 Personen in etwa durch die Senkung der mittleren Strahlungstemperatur um $1,2\text{ K}$ bei ruhigem Sitzen, und um $1,0\text{ K}$ bei "Büroarbeit" ausgeglichen werden. Bei dieser Gewichtung ergaben sich keine signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschiede.

In einer experimentellen Untersuchung (McNall et al., 1968), in der das thermische Empfinden der Umgebung in Abhängigkeit von T_a und T_{mrt} von 160 Probanden untersucht wurde, ergab sich, daß die Erhöhung von T_a um 1 K durch ein Senken von T_{mrt} um $1,4\text{ K}$ bei sitzenden Probanden und um $1,2\text{ K}$ bei leichter Aktivität kompensiert werden konnte, so daß sich das gleiche thermische Empfinden einstellte.

Diese sich etwas von den Berechnungen unterscheidenden Ergebnisse lassen sich durch etwas höhere Windgeschwindigkeiten bei den experimentellen Untersuchungen ($v = 0,15\text{ m/s}$) deuten, da bei höherem v durch die damit größere Wärmeübergangszahl der Fluß fühlbarer Wärme und damit die Lufttemperatur eine größere Gewichtung erhält.

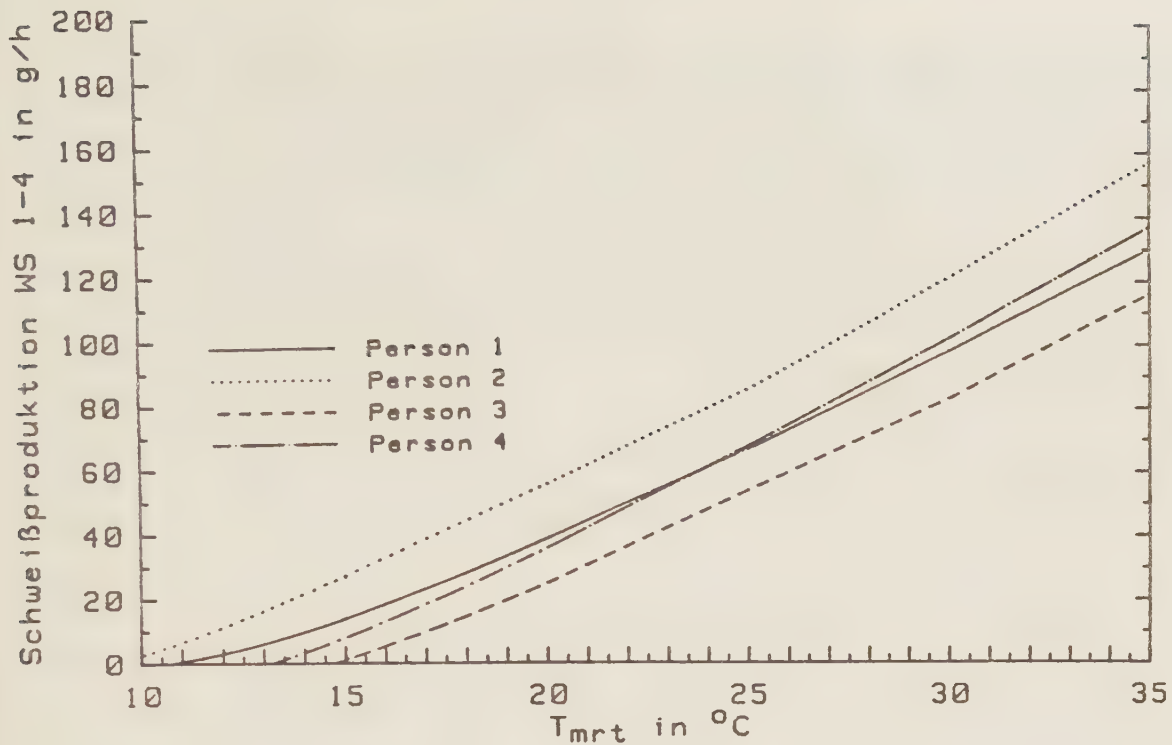


Abb.38: Schweißraten WS von 4 Personen in Abhängigkeit von der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} ($T_a=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12\text{ mb}$, $v=0,1\text{ m/s}$) bei Büroarbeit (AKT= 110 W) im Raumklima.

Die Wärme-flüsse zu den Abbildungen 36-38 sind im Anhang in Tabelle 12 zusammengestellt.

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Empfehlungen für ein behagliches Raumklima, die jedoch teilweise nur sehr unpräzise Angaben dazu machen. Wie die Berechnungen gezeigt haben reichen diese oft nicht aus um den thermisch-hygrischen Wirkungskomplex befriedigend zu beschreiben. So sollte sich nach Billington (1967) ein Raumklima durch eine um ca. 2-3 K höhere Strahlungstemperatur als Lufttemperatur von einheitlich temperierten Oberflächen, eine mittlere Windgeschwindigkeit von von ca. 0,2 m/s im Winter und 0,4 m/s im Sommer und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% auszeichnen. Nach Frank (1975) sollte die Lufttemperatur in Räumen zwischen 18°C und 24°C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30 -70% liegen. Der Luftfeuchtigkeit wird dabei im genannten Temperaturbereich keine große energetische Bedeutung für den Körper, sondern vielmehr für die Lufthygiene, beige-messen. Nach Haider (1974) sollte die mittlere Strahlungstemperatur

in Räumen unter 32°C liegen. Horizontale Unterschiede der Lufttemperatur sollten unter 2 K und vertikale unter 3 K liegen. Die Windgeschwindigkeit sollte 0,1-0,3 m/s betragen, wobei Luftstille wegen der dadurch hervorgerufenen Klimamonotonie negativ zu werten ist. Auch Haider (1974) gibt das Optimum der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 30% und 70% an. Nach Grandjean (1973) sollten in einem behaglichen Raumklima die Oberflächentemperaturen der Umschließungsflächen nicht mehr als 3 K von der Lufttemperatur abweichen.

Die Empfehlungen für Raumklimate, wie sie z.B. in der Arbeitsstätten Richtlinie (nach Wenzel et al., 1980) gegeben werden, berücksichtigen meistens die mittlere Strahlungstemperatur der Umschließungsflächen überhaupt nicht.

In den Abbildungen 27-38 sind jeweils bei den Darstellungen der mittleren Hauttemperaturen die in Kapitel 6 definierten Behaglichkeitsgrenzen für T_{sk} und b in Form von roten Linien angegeben. Daraus geht hervor, daß sich nicht jede der untersuchten Personen bei denselben Klimabedingungen im gleichen thermischen Behaglichkeitszustand befinden muß. Vor allem für die älteren Personen und von diesen im besonderen für die weibliche Person errechnet sich in einigen Klimasituationen die Wertung "zu kühl", während für die anderen Personen die Beurteilung "neutral" gilt. Bei Wärmebelastung sind es vor allem die weiblichen Personen, die wegen der geringeren Schweißproduktion unter Hitzestress leiden (z.B. Abb.29).

Um ein Raumklima zu schaffen, das dem Behaglichkeitsbereich einer ihm ausgesetzten Person nahe kommt, ist in Mitteleuropa im Winter eine Beheizung notwendig. Je nach Art des Heizsystems wird die räumliche Verteilung der Luft- und Oberflächentemperaturen, sowie die Windgeschwindigkeit und die Luftfeuchtigkeit unterschiedlich beeinflusst. So führt nach Mayer et al. (1979) das Aufstellen eines Konvektionsheizkörpers unter dem Fenster zu kleineren vertikalen Unterschieden der Lufttemperatur als bei der Aufstellung an einer Innenwand.

Schüle (1956) hebt die Bedeutung der Boden- und Deckentemperaturen für die Behaglichkeit hervor. Danach sollte die Fußbodentemperatur nicht unter 16°C liegen. Aber auch zu hohe Fußbodentemperaturen z.B. durch Bodenheizung können sich negativ auf das Wohlbefinden auswirken. Nach Schüle (1956) sollten sie nicht über 26°C liegen, da zu hohe Bodentemperaturen zu einer gesteigerten Durchblutung der Beine und dadurch zu zirkulatorischen Störungen führen können. Die Oberflächentemperaturen

der Decken sollten dagegen zwischen 25°C und 30°C betragen. Die im biometeorologischen Sinne günstigste künstliche Beheizung von Wohnräumen ist nach Schüle (1956) die Kachelofenheizung. Sie führt zu relativ ausgeglichenen Temperaturverhältnissen der Luft und der Umschließungsflächen.

Neben der künstlichen Klimatisierung von Räumen gewinnt vor allem wegen steigender Energiekosten die natürliche Klimatisierung durch die geeignete Wahl von Baumaterialien, die Ausrichtung des Gebäudes und die Bemessung von Fenstern an Bedeutung, wie von Baldia (1974) für Schulräume gezeigt wurde. Dabei ist eine in natürlich klimatisierten Räumen auftretende zeitliche Variation der meteorologischen Parameter des Raumklimas in einem nicht zu weiten Bereich für einen sich im Raum aufhaltenden Menschen sicher von Vorteil, da nach Haider (1974) Klimamonotonie zu einer Schwächung des Organismus und mangelhafter Adaptationsfähigkeit führt und diese wiederum gesteigerte Wetterfähigkeit zur Folge haben kann. Langsame Schwankungen der meteorologischen Parameter können dagegen ein Gefühl der Frische vermitteln. Auch soll das Raumklima sich in stark gedämpften Maße mit dem Außenklima verändern (Wenzel et al., 1980, Auliciems, 1981), da sich die Wahl der Bekleidung häufig auch nach dem herrschenden Außenklima richtet. Diesem Anspruch werden natürlich klimatisierte Räume in jedem Fall gerecht.

Es sollte daher beim Bau von Häusern nicht wie es heute üblich ist so vorgegangen werden, daß ein Architekt einen fertigen Bauplan vorlegt, zu dem dann von einem Klimaingenieur die notwendige Klimatisierung berechnet wird. Sondern zuerst sollten die thermischen Bedürfnisse der sich im projektierten Gebäude aufhaltenden Menschen quantitativ beschrieben werden und dann sollte versucht werden diese mit geeigneten baulichen Maßnahmen zu befriedigen oder zumindest zu optimieren. Dazu wären jedoch nach Straaten et al. (1967) noch viele experimentelle Untersuchungen zur Quantifizierung der Bedürfnisse notwendig. Von der theoretischen Seite wurde dies in diesem Abschnitt für den thermischen Wirkungsfaktor in Wohn- und Büroräumen versucht.

Zu den Raumklimaten sind jedoch auch die Klimabedingungen in Werkshallen, Kühlhäusern, Schwimmbädern u.v.a zu rechnen, deren Diskussion hier jedoch zu weit führen würde, mit dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren aber jederzeit möglich ist. Meßwerte der Tagesgänge der bedeutenden meteorologischen Parameter in verschiedenen Raumklimaten wurden z.B von Vaitl (1980) erhoben.

7.2 Der Mensch im Ruhestadium

Trotz der Tatsache, daß ein Mensch ca. ein Drittel seines Lebens im Schlaf verbringt, gibt es nur sehr wenige Untersuchungen des "Bioklimas" während dieser Lebensphase, was nach Kevan (1978) wohl vor allem auf Schwierigkeiten bei der Schaffung der experimentellen Versuchsbedingungen zurückzuführen ist.

Während des Schlafes erreicht der Metabolismus - sieht man einmal von extrem belastenden thermischen Bedingungen ab - sein Minimum in Höhe des Grundumsatzes GRU.

Nach einer kurzen Anpassungszeit, in der durch eine leichte Senkung der Kerntemperatur und Erhöhung der mittleren Hauttemperatur eine Beheizung der Betthöhle erreicht wurde (Müller-Limroth, 1977), ist die Energiebilanz ohne Energiespeicherung ausgeglichen.

Sollten sich jedoch die Klimabedingungen um den Schlafplatz deutlich im Laufe der Nacht ändern, so kann wegen der im Schlaf eingeschränkten Fähigkeit zur Thermoregulation (Bronswijk et al., 1982) Energiespeicherung oder Entzug auftreten. Nach Müller-Limroth (1977) ist jedoch bis heute noch nicht befriedigend geklärt, inwieweit die Funktion der thermoregulatorischen Zentren während des Schlafes ausgeschaltet sind. Vor allem aber in der REM - Schlafphase (Rapid-Eye-Movement) kann man von der Ausschaltung der internen Thermoregulation ausgehen.

So ist es auch nicht verwunderlich, daß Landsberg (1938) eine eindeutige Korrelation zwischen der Betthöhletemperatur beim Zubettgehen und der maximal während der Nacht erreichten fand und Candas et al. (1979) von einer starken Korrelation zwischen Betthöhletemperatur und der nächtlichen Schwankung der Kerntemperatur berichten.

Nach Geschickter et al. (1966) tritt Schweißsekretion während des Schlafes hauptsächlich in den ersten Stunden nach dem Einschlafen auf.

Ein für einen schlafenden Menschen ungünstiges Klima äußert sich naturgemäß nicht direkt wie beim wachen Menschen in einer Beeinträchtigung der Behaglichkeit, sondern nach Erhardt et al. (1978) bei kalten Bedingungen in häufigerem Erwachen und bei zu warmen Bedingungen in unruhigerem Schlaf.

Wie die folgenden Berechnungen zeigen werden, ist während des Schlafes die Veränderung der Körperhaltung und der Anteile der bedeckten Körperpartien ein gutes Mittel den Wärmeaustausch mit der Umgebung zu beeinflussen. Zur Berechnung der Energieflüsse während des Schlafes bieten sich zwei etwas unterschiedliche Modelle an.

1. Als Umgebungsklima des Körpers wird das Betthöhlenklima angesehen. Die Wärmeisolation des Körpers wird nur durch die Isolation der Nachtkleidung gebildet.
2. Das Umgebungsklima wird durch das Raumklima dargestellt, in dem sich der Schlafplatz befindet. Die Wärmeisolation der Bettdecke und der Matratze wird als Bekleidungsisolation zur Isolation der Nachtkleidung addiert.

Das 2. Modell hat den entscheidenden Vorteil, daß mit ihm auch die Wärmeflüsse von den unbedeckten Körperpartien erfaßt werden können. Die Berechnungen sollen für 3 verschiedene Oberbettmaterialien, die in der Tabelle 17 näher beschrieben sind, durchgeführt werden.

Tab.17: Thermische und hygrische Eigenschaften von verschiedenen Oberbettmaterialien (Typ 1-3) nach Müller-Limmroth (1977); I_{cl} in clo ($\text{m}^2\text{K W}^{-1}$), R_D in $\text{m}^2\text{mb W}^{-1}$.

		I_{cl}	R_D
Typ 1	Steppdecke 100% Polyester Bezug: 80% Pol., 20% Bw. Masse: 2750 g, Dicke: 5,5 cm	3,4 (0,527)	0,375
Typ 2	Steppdecke Daunen Bezug: 100% Baumwolle Masse: 2740 g, Dicke: 9,5 cm	4,2 (0,651)	0,628
Typ 3	Webdecke Acryl+Baumwolle Masse: 2530 g, Dicke: 2,5 cm	1,9 (0,295)	0,259

Nach Müller-Limmroth (1977) ist der Wärme- und Feuchtedurchgangswiderstand von gebräuchlichen Matratzen verglichen mit denen der Bettdecken sehr groß, so daß der überwiegende Feuchte- und Wärmeaustausch mit der Umgebung durch das Oberbett erfolgt. Die Wärme- und Feuchteflüsse durch die Matratze werden aus diesem Grund bei den Modellansätzen vernachlässigt werden.

Es verbleibt demnach eine effektiv "tätige" Oberfläche des Menschen von ca. 68% der Oberfläche A_{Du} bei Rückenlage und ca. 81% von A_{Du} bei Seitenlage. Dies sind die Oberflächenanteile des Körpers, die nicht auf der Matratze aufliegen. Für die Gesamtwärmeisolation der bedeckten

Anteile der Körperoberfläche ist die Summe des Wärmedurchgangswiderstandes der Nachtkleidung, der hier zu 0,5 clo angenommen wird, und der Bettdecke anzusetzen. Die Oberflächenvergrößerung durch die verschiedenen Bettdecken beträgt beim Typ 1 ca. 32% ($f_{cl}=1,32$), beim Typ 2 ca. 56% ($f_{cl}=1,56$) und beim Typ 3 ca. 15% ($f_{cl}=1,15$), wenn man als mittleren Radius des Körpers 0,17 m annimmt. Bei der Berechnung der Wärme Flüsse F_{KL} durch die Bettdecke ist wegen der enormen Oberflächenvergrößerung (101) anzusetzen.

Die effektive Strahlungsoberfläche A_{eff} entspricht beim ruhenden Menschen in etwa der Oberfläche A_{cl} , die sich aus der Bettdeckenoberfläche und den nicht aufliegenden Anteilen des unbedeckten Körpers zusammensetzt.

In den Modellrechnungen sollen folgende Situationen simuliert werden:

- A: Rückenlage
- B: Seitenlage

Für beide Lagen jeweils nicht von der Bettdecke bedeckt:

- a: Kopf
- b: Kopf + 1 Arm
- c: Kopf + beide Arme
- d: Kopf + beide Arme + 1 Bein (vom Fuß bis zum Knie)

Für den Fall a ergibt sich ein unbedeckter Anteil der "tätigen" Oberfläche von ca. 7%, für den Fall b von ca. 18%, für c von ca. 28% und für d von ca. 34%.

Bei der Berechnung des Energieentzuges durch Wasserdampfdiffusion ist wegen des vergleichsweise hohen Diffusionswiderstandes der Bettdecken die Summe aus dem Widerstand der Haut und der Bettdecke anzusetzen. Bei allen Berechnungen ging ein Dampfdruck der Umgebungsluft $e_1=10,3$ mb, eine Windgeschwindigkeit $v=0,05$ m/s und eine mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} jeweils in Höhe der Lufttemperatur T_a ein.

In Tabelle 18 sind die mittleren Hauttemperaturen T_{sk} der 4 in 7.1 schon näher beschriebenen Individuen in Abhängigkeit vom Typus der Bettdecke bei Rücken- und Seitenlage aufgelistet. Die mittlere Hauttemperaturen liegen danach bei der Bettdecke mit dem größten Wärme-

durchgangswiderstand (Typ 2) am höchsten und beim Typ 3 mit dem kleinsten Wärmedurchgangswiderstand am niedrigsten, wobei bei Rückenlage die größte Differenz zwischen beiden Oberbettmaterialien bei der älteren Frau bei 2,8 K liegt. Bei den jüngeren Personen ergeben sich nur Differenzen von 0,6 bzw. 0,3 K. Auch die Unterschiede von T_{sk} zwischen Rücken- und Seitenlage sind bei den älteren Personen wesentlich größer als bei den jüngeren, bei denen sie nur bei der leichten Bettdecke (Typ 3) Bedeutung erlangen.

Tab.18: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ von 4 Individuen im Ruhestadium mit verschiedenartigen Oberbettmaterialien bei Rückenlage (Seitenlage) und einer Körperbedeckung (a) bis zum Kopf ($T_a=18^{\circ}\text{C}$)

	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Pers.1	34,8 (34,2)	34,9 (34,7)	34,3 (31,6)
Pers.2	34,7 (34,7)	34,8 (34,7)	34,5 (32,7)
Pers.3	34,5 (31,8)	34,7 (32,4)	31,9 (29,5)
Pers.4	34,7 (32,8)	34,7 (33,6)	33,0 (30,4)

Die geringere Sensibilität der jüngeren Personen gegenüber unterschiedlichen Oberbettmaterialien oder Körperlagen bei der Lufttemperatur $T_a=18^{\circ}\text{C}$ läßt sich durch die in Tabelle 19 dargestellten Wasserverluste durch Transpiration WS erklären. Hier zeigt sich, daß die ältere Frau (Pers. 3) in den untersuchten Fällen überhaupt keinen Schweiß produziert - der ältere Mann nur in geringem Maße bei Rückenlage und Deckentyp 1 und 2. Die jüngeren Individuen können dagegen bei den unterschiedlichen Deckentypen durch Veränderung der Schweißrate Veränderungen in der Entwärmung des Körpers so steuern, daß die mittlere Hauttemperatur T_{sk} nahezu konstant bleibt. Bei der leichten Bettdecke (Typ 3) ergibt sich nur bei Person 2 und nur bei Rückenlage ein Wasserverlust durch Transpiration, der jedoch nahezu unbedeutend ist.

Vergleicht man nun die mittleren Hauttemperaturen der 4 Individuen bei unterschiedlicher Körperbedeckung durch die Daunendecke (Typ 2), die in Abbildung 39 dargestellt sind, so zeigt sich ein Abfall um bis zu 6,9 K (Pers. 3) bei einer Änderung der Körperbedeckung von Art a (nur Kopf unbedeckt) zu Art d (Kopf+beide Arme+1 Fuß unbedeckt). Die mittleren Hauttemperaturen der älteren Individuen reagieren stärker auf eine Veränderung der Körperbedeckung zwischen a und b, während die der jüngeren Individuen - vor allem des jungen Mannes - nur vergleichsweise leicht sinken. In jedem Fall macht die Abbildung 39 deutlich, daß beim Menschen im Ruhestadium durch die Variation des Bedeckungsgrades eine gute Möglichkeit zum Ausgleich von thermisch belastenden Situationen, eine quasi externe Form der Thermoregulation, gegeben ist. Dies gilt natürlich nur für zu warme Bedingungen.

Tab.19: Mittlerer Wasserverlust durch Transpiration WS (g/h) von 4 Personen im Ruhestadium mit verschiedenartigen Oberbettmaterialien bei Rückenlage (Seitenlage) und einer Körperbedeckung (a) bis zum Kopf ($T_a=18^{\circ}\text{C}$).

	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Pers.1	15 (0)	20 (0)	0 (0)
Pers.2	27 (1)	34 (7)	5 (0)
Pers.3	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Pers.4	3 (0)	8 (0)	0 (0)

Vergleicht man die mittlere Hauttemperatur T_{sk} einer Person (hier Person 1) bei verschiedenen Oberbettmaterialien in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a der Umgebung (Abb.40), so zeigt sich ein Anstieg von T_{sk} mit steigender Lufttemperatur T_a , der bei höheren Lufttemperaturen durch die wachsende Bedeutung der Schweißverdunstung gedämpft wird. Wie zu erwarten war, liegt die mittlere Hauttemperatur T_{sk} bei der Bettdecke Typ 2 am höchsten und bei Typ 3 am niedrigsten; sie nähern sich jedoch bei hohen Umgebungstemperaturen an.

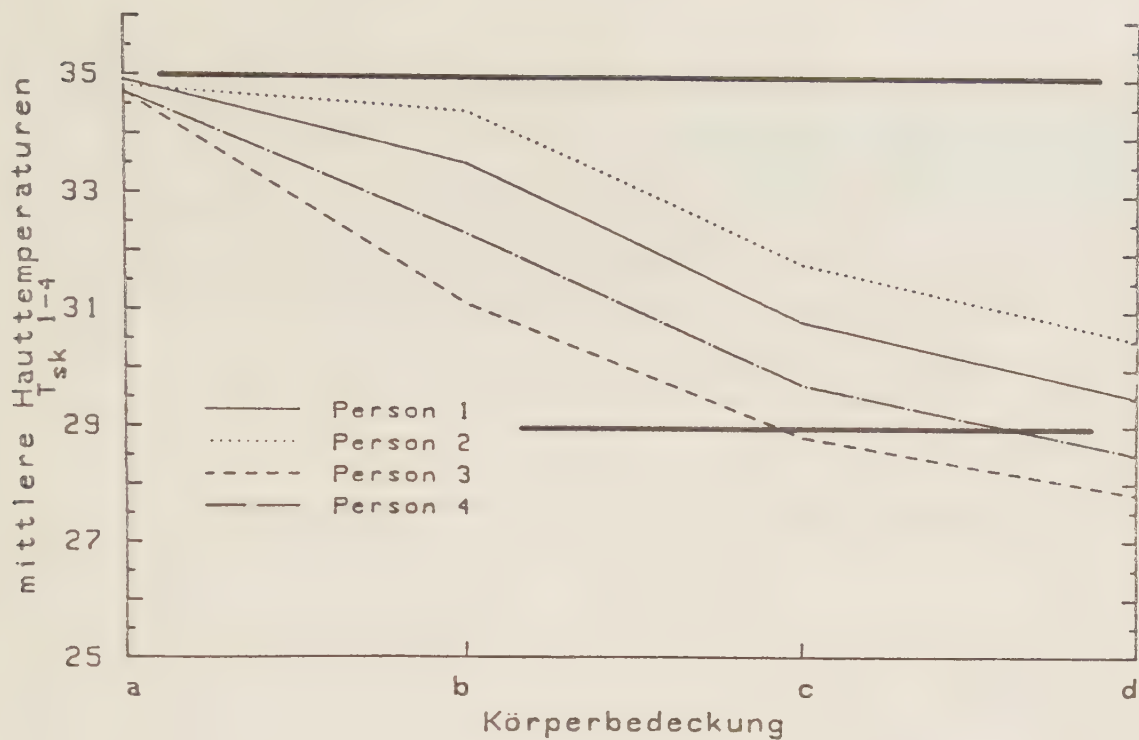


Abb.39: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Individuen im Ruhestadium bei unterschiedlicher Körperbedeckung (a-d) für das Oberbett Typ 2 und Rückenlage ($T_a=18^{\circ}\text{C}$).

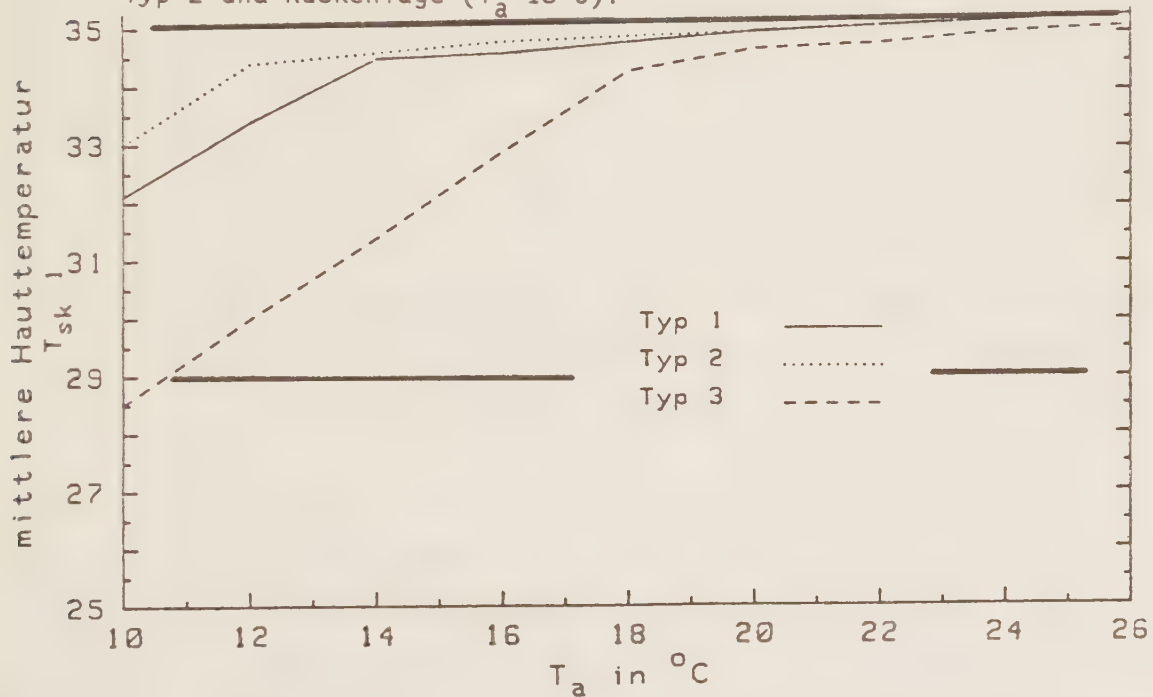


Abb.40: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ einer jungen Frau (Pers.1) im Ruhestadium mit verschiedenartigen Oberbettmaterialien in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a bei Rückenlage und einer Körperbedeckung (a) bis zum Kopf.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Bedeckungsart b (Kopf+1 Arm unbedeckt), die in Abbildung 41 dargestellt ist. Vergleicht man nun Abbildung 40 und 41, die sich nur durch verschiedene Bedeckungsart unterscheiden, so ist allein durch Abdecken eines Armes (Abb.41) eine Verschiebung der Kurven der mittleren Hauttemperaturen zu höheren Lufttemperaturen T_a hin festzustellen. Die Unterschiede der verschiedenen Bettdeckentypen sind bei der Bedeckungsart b erwartungsgemäß geringer als bei a, da ein größerer Anteil der Körperoberfläche von der Bettdecke unbeeinflusst bleibt.

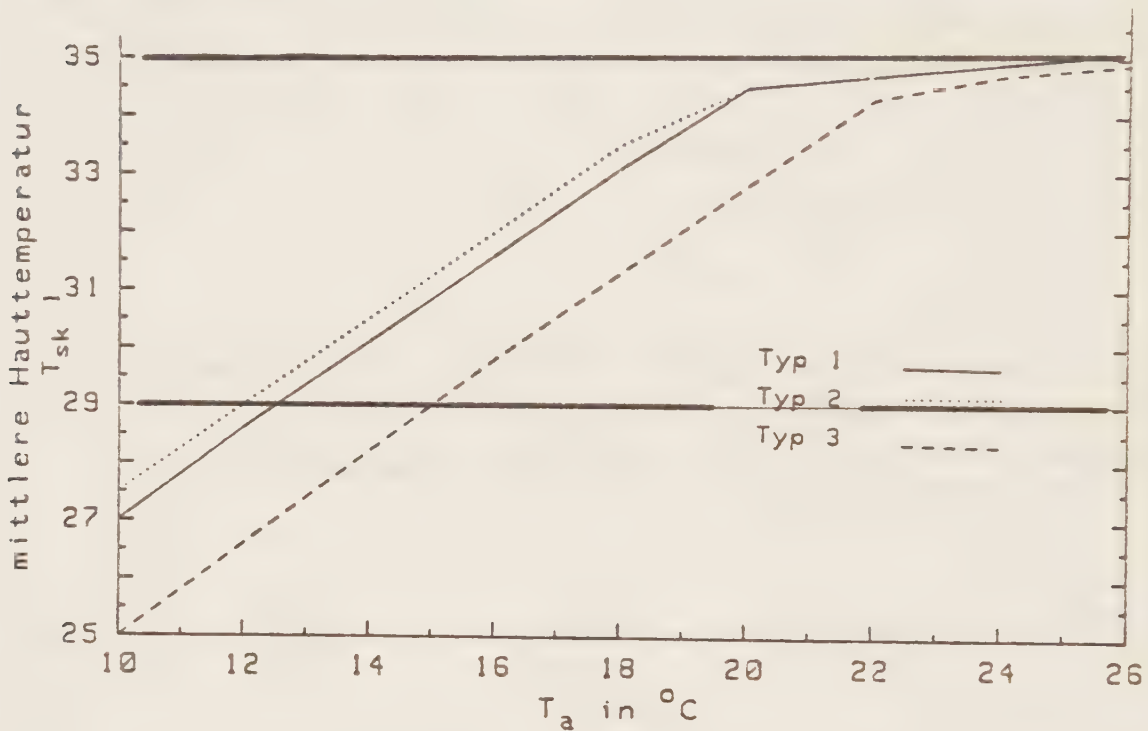


Abb.41: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in °C einer jungen Frau (Pers.1) im Ruhestadium mit verschiedenartigen Oberbettmaterialien in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a bei Rückenlage und einer Körperbedeckung (b) mit unbedecktem Kopf und Arm.

Neben der mittleren Hauttemperatur ist sicher der Hautbenetzungsgrad b ein weiteres Maß für den Schlafkomfort. Der Benetzungsgrad b ist in Abbildung 42 in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a aufgetragen. Er steigt mit zunehmendem T_a und erreicht für die vorgegebene Situation bei $T_a=26^{\circ}\text{C}$ einen maximalen Wert von 36% beim jungen Mann. Es zeigen sich sehr große individuelle Unterschiede der Hautbenetzung vor allem in Bezug auf den Beginn der Benetzung, der beim jungen Mann ca. 6 K tiefer als bei der älteren Frau liegt.

Die großen individuellen Unterschiede zeigen sich auch, wenn man die hypothetisch "optimale" Schlafräumtemperatur für die 3 Bettdeckentypen und die 4 Individuen auflistet (Tab. 20). Die optimale Schlafräumtemperatur wurde als die Lufttemperatur definiert, die zu einer mittleren Hauttemperatur von $33,5^{\circ}\text{C}$ führt. Die optimalen Lufttemperaturen sind in Tabelle 20 für die Körperbedeckungsart a und in Klammern für b angegeben.

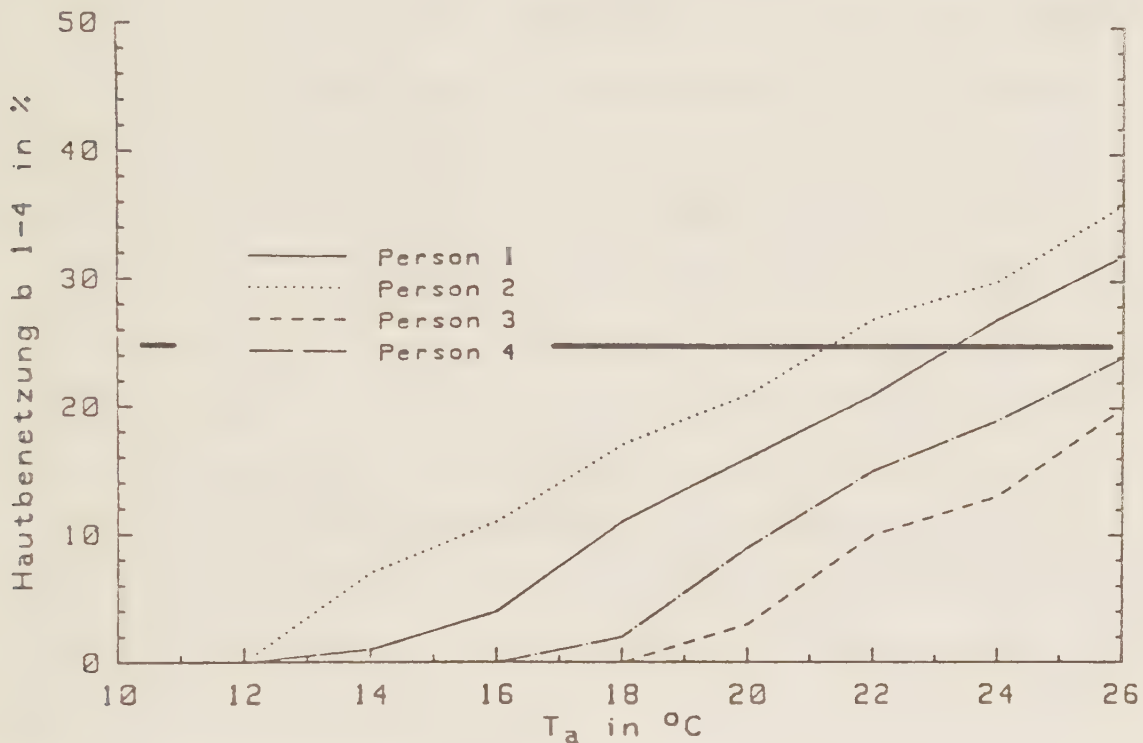


Abb.42: Hautbenetzungsgrad b von 4 Individuen im Ruhestadium in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a bei Rückenlage, der Bedeckungsart a und dem Bettdeckentyp 1.

Danach schwanken die optimalen Schlafräumtemperaturen zwischen 8°C (Pers.2, Typ 2) und 24°C (Pers.3, Typ 3) um 16 K. Allein durch eine Veränderung der Bedeckungsart ($a \rightarrow b$) ist eine Verschiebung der optimalen Temperatur um bis zu 8 K zu erreichen (Pers.2, Typ 2). Zu bedenken ist dabei jedoch, daß bei der Bedeckungsart b dem Körper schon mehr Wärme durch Strahlung und Konvektion von den unbedeckten Körperteilen entzogen wird als von dem großen Oberflächenanteil, der bedeckt ist. Dies kann zu starken Asymmetrien des Wärmeaustausches führen, die negative physiologische Auswirkungen haben könnten (Fanger, 1972).

Betrachtet man nur die optimalen Schlafräumtemperaturen bei der Bedeckungsart a, so ergeben sich zwischen den extremen Personen 2 und 3 Unterschiede je nach Bettdeckentyp von 5-7 K.

Tab.20: Optimale Schlafräumtemperaturen T_a ($^{\circ}\text{C}$) von 4 Personen im Ruhestadium mit verschiedenen Bettdeckentypen (Tab.17) bei den Bedeckungsarten a (b) für Rückenlage.

	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Pers.1	12 (19)	11 (18)	17 (21)
Pers.2	10 (17)	8 (16)	15 (19)
Pers.3	16 (22)	15 (21)	20 (24)
Pers.4	15 (20)	13 (20)	19 (22)

Die sich zu den Abbildungen 39-42 und den Tabellen 18-20 ergebenden Energieflüsse sind in den Tabellen 13-17 im Anhang aufgelistet. In fast allen berechneten Situationen stellt dabei der Strahlungssaldo Q den größten Term der Entwärmung des Körpers dar.

7.3 Der Mensch in extremen Klimazonen der Erde

In den folgenden Abschnitten werden extreme Klimasituationen diskutiert, denen ein Mensch im "Außenklima" ausgesetzt sein könnte. Eines dieser extremen Klimate ist sicher das polare Klima, dessen Einflüsse auf die menschliche Energetik hier zuerst erläutert werden sollen.

7.3.1 Der Mensch im Polarklima

Das Polarklima zeichnet sich in biometeorologischer Hinsicht vor allem durch die sehr tiefen Luft- und Strahlungstemperaturen, den niedrigen Dampfdruck und die häufig sehr hohen Windgeschwindigkeiten aus. Um wirklich extreme Bedingungen zu untersuchen, wurde ein Datensatz klimatischer Parameter aus Orvig (1970) für die Arktis ausgewählt. Die Daten entsprechen mittleren Werten für den Monat Februar. Die mittlere Lufttemperatur T_a wird mit -37°C , der mittlere Dampfdruck e_1 mit 0,2 mb und die mittlere Windgeschwindigkeit v mit 4,0 m/s angegeben. Die vierte in die Energiebilanzgleichung eines Menschen eingehende meteorologische Größe, die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} , berechnet sich bei Verwendung der Angström - Formel für die atmosphärische Gegenstrahlung A' und der Annahme, daß die Oberflächentemperatur des Bodens der Lufttemperatur T_a entspricht zu -51°C . Die in der Meteorologie eingeführte Angströmformel ermöglicht eine Berechnung der atmosphärischen Gegenstrahlung A' als Funktion der Lufttemperatur T_a und des Dampfdruckes e_1 . Sie lautet:

$$A' = \sigma T_a^4 \cdot (a - b \cdot 10^c e_1) \quad (113),$$

wobei σ die Stefan-Boltzmann Konstante, T_a die Lufttemperatur in K und a, b und c Atmosphärenkonstanten sind.

Die Strahlungstemperatur T_{mrt} liegt deshalb so tief, weil in der im Februar herrschenden Polarnacht die diffuse Himmelsstrahlung D und die direkte Sonnenstrahlung I entfallen.

Mit dem genannten meteorologischen Datensatz lassen sich nun verschiedene Situationen mit unterschiedlichen Wärmedurchgangswiderständen der Bekleidung am Beispiel der 4 Individuen simulieren. Die Aktivität in diesen Simulationen wird mit "Gehen" (4 km/h) auf beschwerlichem Untergrund ($\text{AKT}=5 \text{ W/kg}$) angenommen.

In Abbildung 43 sind die mittleren Hauttemperaturen T_{sk} der 4 Individuen in Abhängigkeit von I_{cl} für "Polarklima" aufgetragen. Daraus geht hervor, daß die mittleren Hauttemperaturen T_{sk} der 4 Personen mit sinkendem Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung stark fallen. Vor allem im Bereich von $2,0 \text{ clo} \geq I_{cl} \geq 1,5 \text{ clo}$ ist ein extremer Abfall der mittleren Hauttemperaturen zu verzeichnen. Während die individuellen Unterschiede von T_{sk} bei I_{cl} - Werten von mehr als 3,5 relativ gering sind, wachsen diese Unterschiede mit sinkendem Wärmedurchgangswiderstand. Dabei liegen die mittleren Hauttemperaturen der weiblichen Personen (Pers. 1 und 3), wegen des geringeren Grundumsatzes, tiefer als die der männlichen (Pers. 2 und 4). Erfrierungen sind daher bei der hier vorliegenden gleichen Aktivität zuerst bei den Frauen zu erwarten. Die Tatsache, daß sich bei $I_{cl}=4,5 \text{ clo}$ und teilweise noch bei $I_{cl}=4,0 \text{ clo}$ eine positive thermische Belastung berechnet (Tab.18 im Anhang) ist auf den großen Hautbenetzungsgrad der hierbei über 25% liegt, zurückzuführen. Dieser hohe Benetzungsgrad ist durch

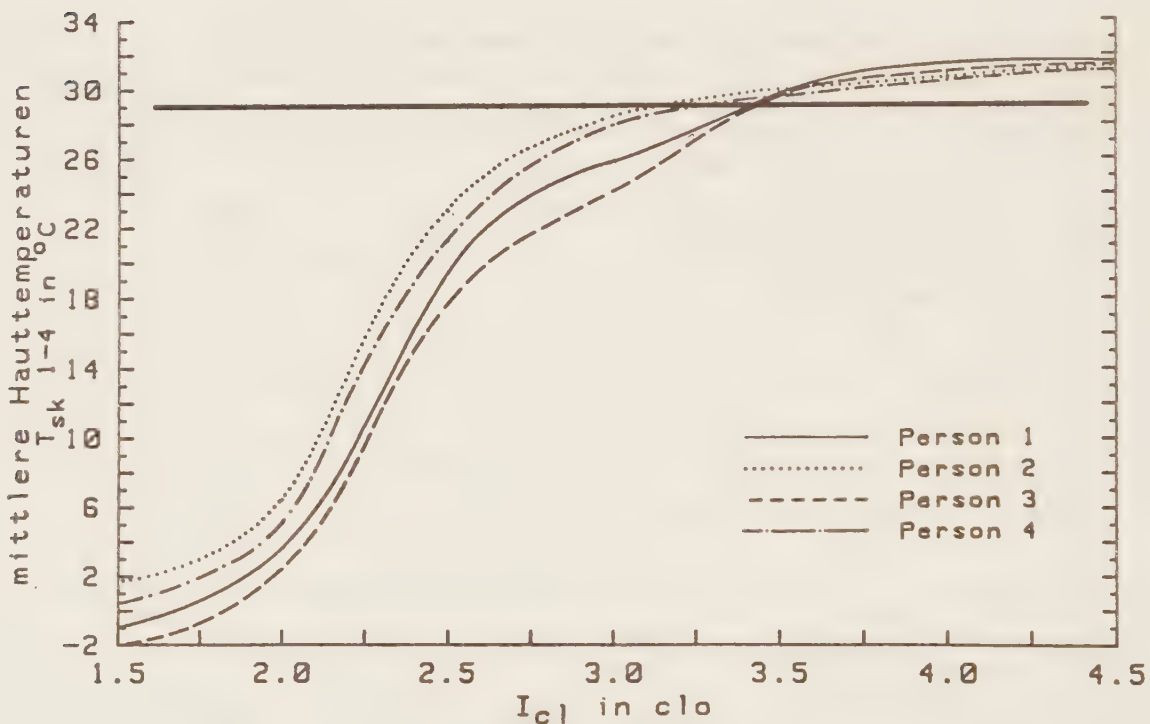


Abb.43: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ von 4 Personen im Polarklima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Bekleidung.

die, wegen der hohen metabolischen Rate relativ hohe Kerntemperatur und die dadurch verursachte Transpiration zusammen mit einer geringen potentiellen Schweißverdunstung durch die sehr dicke Bekleidungsschicht zu erklären. Dadurch liegen auch die mittleren Hauttemperaturen der weiblichen Personen bei hohen I_{cl} -Werten über denen der stärker transpirierenden männlichen Personen.

An diesem Beispiel wird deutlich, daß eine Komfortbewertung nach einem strikten Schema sehr problematisch sein kann, da hier ein Mensch trotz des hohen Benetzungsgrades wegen der unter dem Optimum liegenden mittleren Hauttemperatur die Umgebung nicht als "thermisch belastend" empfinden wird.

Führt man dieselben Berechnungen mit der inneren Wärme H von ruhig stehenden Menschen durch, so zeigt sich, daß ein Aufenthalt von längerer Dauer in diesen Klimabedingungen nicht möglich ist, da sich dann selbst bei Bekleidungsisolationen von $I_{cl}=5,0$ clo negative mittlere Hauttemperaturen einstellen. Der Wert von $I_{cl}=5,0$ clo liegt bereits über den von Fanger (1972) für schwere Polarkleidung angegebenen Werten von 3-4 clo.

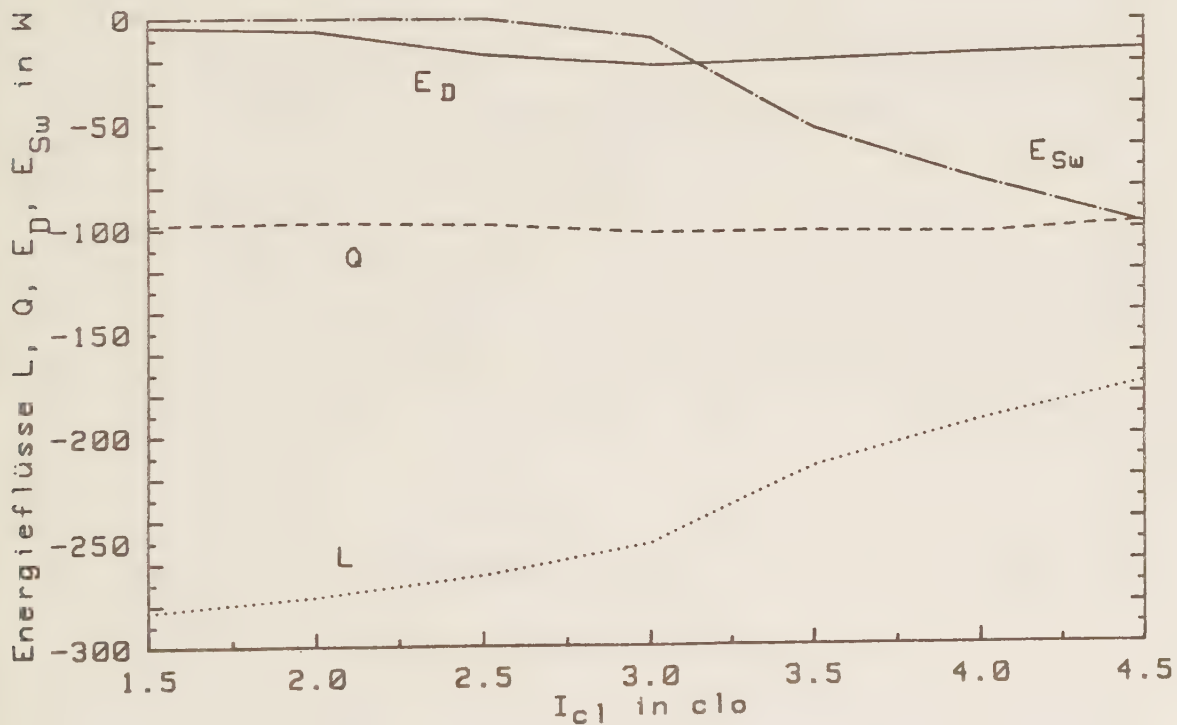


Abb.44: Energieflüsse vom Körper eines jungen Mannes (Pers.2) im Polarklima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung ($H=419$ W).

Vergleicht man die einzelnen Energieflüsse an einem Menschen, wie in Abbildung 44 für den jungen Mann (Pers.2) dargestellt, so fällt die Dominanz des Flusses fühlbarer Wärme L bei der Entwärmung des Körpers auf, der im gezeigten Bereich von I_{cl} zwischen -287 W und -175 W liegt. Die Nettostrahlung Q des Menschen bleibt nahezu konstant. Der latente Wärmefluß E_{sw} durch Transpiration hat im Bereich $I_{cl} < 3 \text{ clo}$ keine Bedeutung für die Energiebilanz des Menschen mehr. Der Energiefluß E_D durch Wasserdampfdiffusion steigt zuerst wegen der größer werdenden mittleren Hauttemperatur und sinkt dann wegen des steigenden Benetzungsgrades der Haut wieder leicht ab. Der Energiefluß E_{Re} in die Atemluft bleibt konstant bei 35 W , da die Kleidungsart auf die Respiration keinen Einfluß hat.

Der Wasserverlust WS der 4 Personen für die Simulation "Polarklima" durch Schweißsekretion ist der Tabelle 18 im Anhang zu entnehmen. Er liegt im Bereich zwischen 0 g/h bei $I_{cl} 3,0 \text{ clo}$ und 154 g/h bei Person 2 und $I_{cl}=4,5 \text{ clo}$. Der Wasserverlust WR über die Atmung ist ebenfalls bei Person 2 am größten und beträgt hier unabhängig von der Bekleidung 51 g/h .

7.3.2 Der Mensch im subtropischen Klima

Das Klima in den subtropischen Zonen der Erde zeichnet sich in biometeorologische Hinsicht vor allem durch sehr hohe Tagesmaxima der Lufttemperatur, durch hohe solare Strahlungsflüsse und durch eine geringe relative Luftfeuchtigkeit aus. Zu diesen Charakteristika addiert sich häufig eine hohe kurzwellige Reflexstrahlung r , die durch eine hohe Albedo des Bodens, der in diesen Regionen meist trocken und spärlich bewachsen ist, begründet ist.

Um nun wie in Abschnitt 7.3.1 für das polare Klima auch für das subtropische Klima die menschliche Energiebilanzgleichung und die damit verbundenen Größen diskutieren zu können, wurde ein klimatologischer Datensatz nach Griffiths (1972) für Luxor (Ägypten) ausgewählt. Danach kann an einem Julitag ein mittleres Maximum der Lufttemperatur von 41°C , ein mittlerer Dampfdruck von $e_1=12,6$ mb, eine Windgeschwindigkeit von $v=2,0$ m/s und ein mittlerer Wert der Globalstrahlung von ca. 900 W/m^2 angenommen werden. Setzt man nach Dirmhirn (1964) an, daß bei wolkenlosem Himmel 15% der Globalstrahlung der diffusen Himmelsstrahlung entstammen, so erhält man für $D=135 \text{ W/m}^2$ und $I=765 \text{ W/m}^2$ (auf horizontale Fläche). Unter der Annahme einer Albedo von 0,30 (trockener Sand) ergibt sich eine Strahlungsflußdichte der kurzwelligen Reflexstrahlung von $r=270 \text{ W/m}^2$. Die atmosphärische Gegenstrahlung wurde über die Angström - Formel (113) zu $A=323 \text{ W/m}^2$ errechnet.

Aus diesen Daten und der Annahme, daß die Strahlungstemperatur der Erdoberfläche der Lufttemperatur T_a entspricht, was sicher eine Unterschätzung ist, läßt sich die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} berechnen. Sie wurde hier, wie auch in Tabelle 21 dargestellt für je zwei verschiedene kurzwellige Absorptionszahlen α_{ir} und je zwei Körperpositionen berechnet.

Tab.21: Mittlere Strahlungstemperaturen T_{mrt} in $^{\circ}\text{C}$ für die Simulation "Subtropen".

Körperposition	Absorptionszahl	
	$\alpha_{ir}=0,7$	$\alpha_{ir}=0,4$
stehend	51,9	40,6
liegend	69,0	51,7

Die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} ist beim liegenden Menschen wesentlich höher, da bei der sehr hoch stehenden Sonne die Projektionsfläche der Oberfläche des Menschen zur direkten Sonnenstrahlung hierbei um ein Vielfaches größer ist.

Die Tatsache, daß hier zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur viele Annahmen und Vereinfachungen notwendig waren, ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, daß es nahezu unmöglich ist, in der Literatur für verschiedenartige Klimazonen geschlossene biometeorologisch relevante Datensätze zu finden.

Im folgenden werden die typischen thermophysiologischen Reaktionen der 4 Personen im Subtropenklima diskutiert. Dazu sind in der Abbildung 45 die mittleren Hauttemperaturen T_{sk} der ruhig stehenden Individuen in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} für dunkle Kleidung ($\alpha_{ir}=0,7$) dargestellt. Daraus geht hervor, daß im gezeigten Bereich von I_{cl} eine Abnahme der mittleren Hauttemperaturen bei Zunahme der Bekleidungsisolations erfolgt.

Dieser Umstand ist dadurch zu erklären, daß mit zunehmendem Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung der Wärmefluß F_{KL} durch die Kleidung, der hier von der Kleidungsoberfläche zur Haut fließt, vermindert wird.

Die individuellen Unterschiede der 4 Personen bestehen aus leicht höheren Hauttemperaturen der weiblichen Personen, für die die untersuchte Klimasituation belastender als für die männlichen Personen ist.

Eine geringere Toleranz von Frauen gegenüber Hitzestress wird auch von Axelson (1974) angedeutet. Altersspezifische Unterschiede sind hier kaum festzustellen, da die mittleren Hauttemperaturen vor allem von der Schweißverdunstung E_{sw} gesteuert werden, in deren Berechnung kein altersspezifischer Parameter eingeht. Im Bereich $1,6 \text{ clo} \leq I_{cl} \leq 2,0 \text{ clo}$ bleiben hier, im Gegensatz zum Polarklima, die mittleren Hauttemperaturen der 4 Personen nahezu konstant.

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei der Darstellung der Wasserverluste WS durch Transpiration in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung (Abb.46). Die Wasserverluste WS nehmen mit zunehmendem I_{cl} ab, und bleiben dann nahezu konstant. Die Wasserverluste WR der 4 Personen durch die Atmung liegen zwischen 21 g/h und 27 g/h, die durch Diffusion von Wasserdampf WD in derselben Größenordnung.

Um ein umfassendes Bild über die Behaglichkeitskriterien in der untersuchten Situation zu erhalten, muß auch der Hautbenetzungsgrad b betrachtet werden (Abb.47).

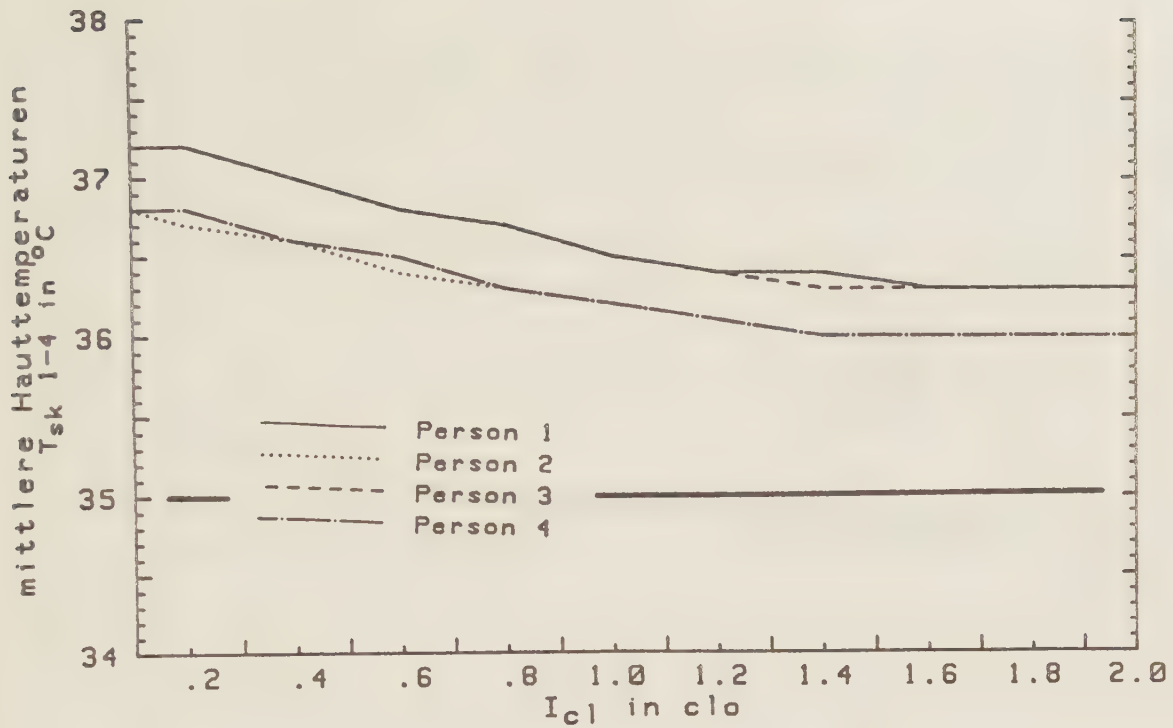


Abb.45: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ von 4 Personen im Subtropenklima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung ($\alpha_{ir}=0,7$, ruhig stehend).

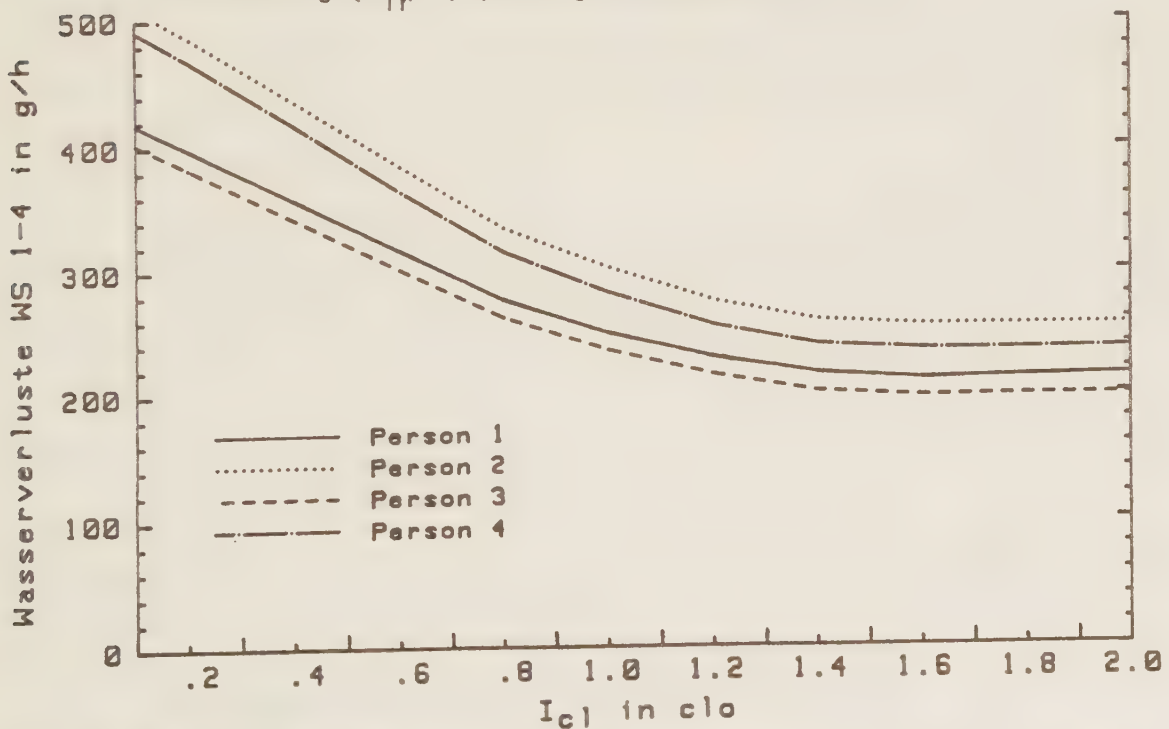


Abb.46: Wasserverluste WS durch Transpiration von 4 Personen im Subtropenklima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung ($\alpha_{ir}=0,7$, ruhig stehend).

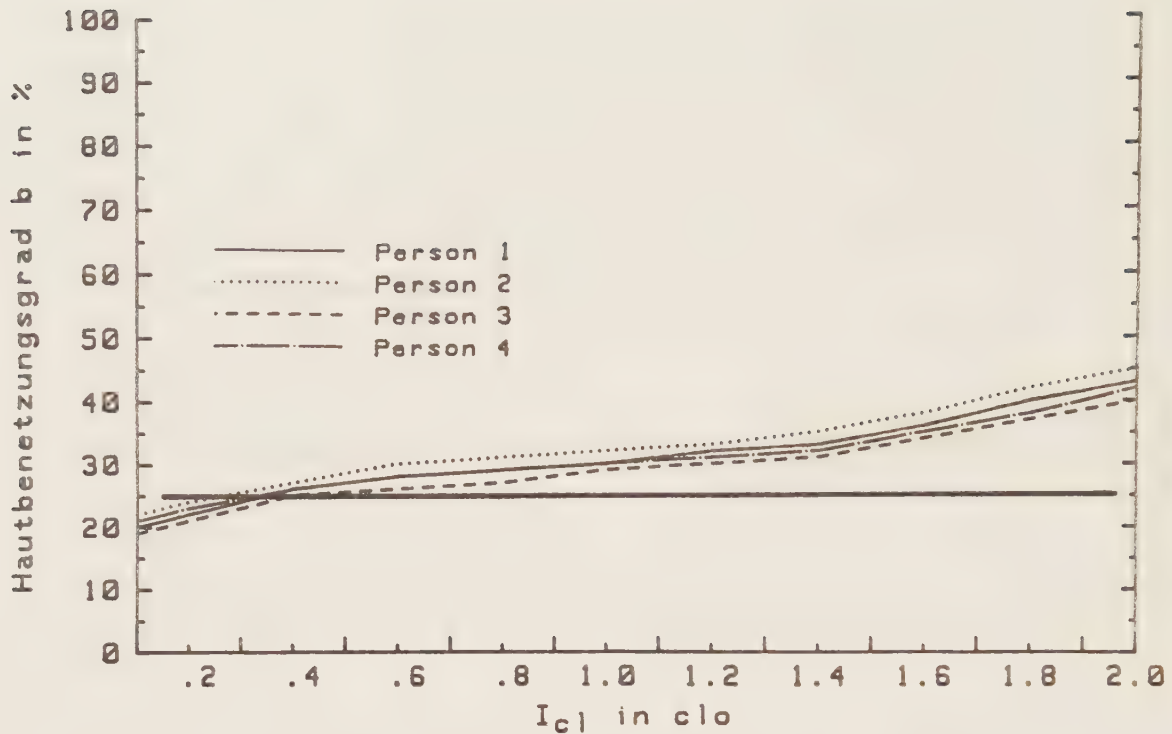


Abb.47: Hautbenetzungsgrad b von 4 Personen im Subtropenlima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung ($\alpha_{ir}=0,7$, ruhig stehend).

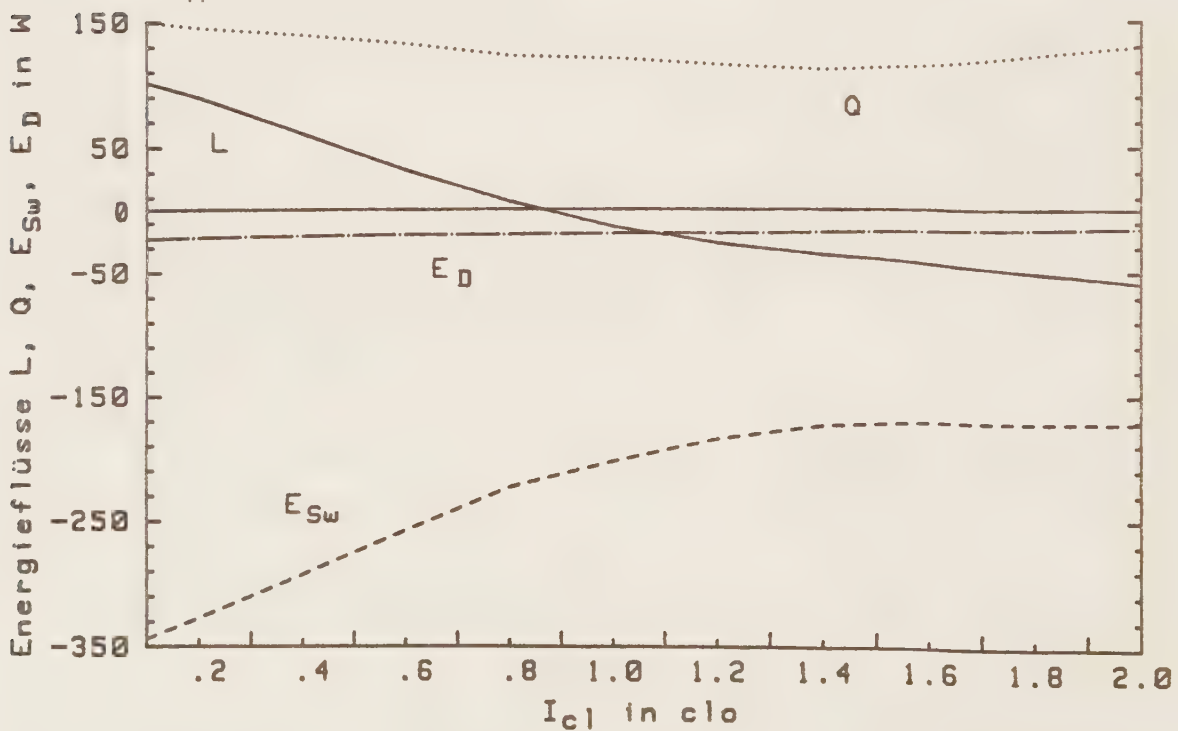


Abb.48: Energieflüsse L , Q , E_{sw} , E_D vom Körper eines jungen Mannes im Subtropenlima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung ($\alpha_{ir}=0,7$, ruhig stehend).

Hier zeigt sich eine stetige Zunahme der Hautbenetzung von ca. 20% bis über 40% bei einer Steigerung von I_{cl} von 0,1 clo bis 2,0 clo. Diese Steigerung, die durch die Behinderung der Wasserverdunstung durch die Kleidung hervorgerufen wird, fällt bei allen Personen annähernd in gleicher Höhe aus. Die ideale Bekleidung für subtropische Klimabedingungen müßte daher einen Kompromiß zwischen möglichst geringen Hauttemperaturen (hohes I_{cl}), einem damit verbundenen geringen Wasserverlust und einem nicht zu großen Benetzungsgrad der Haut (kleines I_{cl}) schaffen. Das Optimum von I_{cl} dürfte aus diesen Gründen zwischen 1,0 clo und 1,4 clo liegen.

Bei den hier untersuchten Klimabedingungen fließt auch der Wärmestrom durch die Kleidung F_{KL} zur Hautoberfläche, an der vor allem durch die Verdunstung des Schweißes Energie abgegeben wird. Dies wird auch aus Abbildung 48 deutlich, in der die Energieflüsse am Beispiel des jungen Mannes aufgetragen sind. Danach ist der Strahlungssaldo aufgrund der hohen mittleren Strahlungstemperatur der Umgebung immer positiv, und führt zu einer Erwärmung der jeweiligen absorbierenden Oberfläche.

Der Fluß fühlbarer Wärme L führt bis zu $I_{cl} \leq 0,9$ clo zu einem Energiegewinn des Körpers, kehrt sich jedoch bei höheren I_{cl} -Werten in einen leichten Energieverlust um. Dies ist durch die große Schweißverdunstung E_{sw} und die dadurch relativ kühle Körperoberfläche (Haut) bei niedrigem I_{cl} und die höheren Oberflächentemperatur der trockenen Bekleidung bei hohen I_{cl} zu erklären.

Die Temperatur der Bekleidung T_{cl} erreicht bei der hier betrachteten dunklen Bekleidung 42,9°C. Bei der hellen Bekleidung liegen die Kleidungstemperaturen T_{cl} deutlich tiefer (siehe Tab.19 und 20 im Anhang). Der Vorteil der helleren Bekleidung für den thermischen Komfort, gemessen an den mittleren Hauttemperaturen (Abb.49), verschwindet fast gänzlich bei hohen I_{cl} -Werten. Bei $I_{cl}=2,0$ clo liegen die mittleren Hauttemperaturen bei dunkler Bekleidung für die Person 2 nur noch um 0,2 K über denen bei heller Bekleidung.

Als ein guter Beleg für die Plausibilität der aus den Berechnungen abgeleiteten Aussagen können die Bekleidungsgewohnheiten der Nordafrikaner angesehen werden. Die traditionelle Bekleidung besteht aus vielen Tuschichten (hohes I_{cl}) die kuttenartig am Körper getragen werden. Je nach Stammeszugehörigkeit werden helle, aber auch dunkle Stoffe bevorzugt.

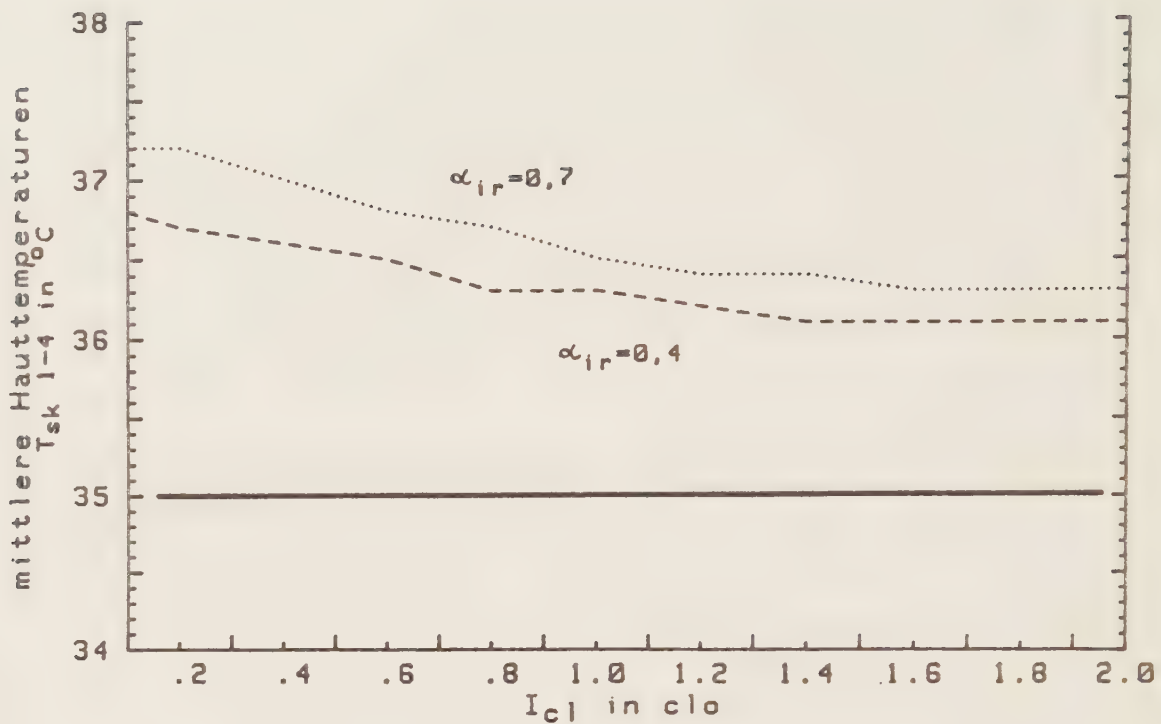


Abb.49: Mittlere Hauttemperatur T_{sk} von Pers.2 im Subtropenklime in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} bei dunkler ($\alpha_{ir}=0,7$) und heller ($\alpha_{ir}=0,4$) Bekleidung (ruhig stehend).

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich ein Mensch längere Zeit ohne zu große thermische Belastung in subtropischen Klimazonen aufhalten kann, vorausgesetzt er nimmt genügend Wasser zu sich und strengt sich körperlich nicht zu sehr an. Bei "ruhigem Stehen" und günstiger Bekleidung ist hier mit einem Wasserverlust von ca. 1/4 l/h (bei einem Aufenthalt von 12 Stunden im Freien entspricht dies einem Wasserverlust von 3 l) zu rechnen, der durch Trinken ausgeglichen werden muß.

7.3.3 Der Mensch im feuchttropischen Klima

Das Tropenklima wird i.a. wegen der herrschenden hohen relativen Luftfeuchtigkeit bei hoher Lufttemperatur und geringen Windgeschwindigkeiten als belastend für den Menschen angesehen. Um die Auswirkungen dieser Belastung auf die Energetik des Menschen zu diskutieren wurden Berechnungen für die 4 Personen mit meteorologischen Daten nach Rudloff (1982) für Pontianak auf Borneo durchgeführt.

Danach kann als mittleres Maximum der Lufttemperatur $T_a=34^{\circ}\text{C}$ und als Dampfdruck $e_1=37\text{ mb}$ angenommen werden. Die Windgeschwindigkeit wird zu $v=1,0\text{ m/s}$ angesetzt. In der zu berechnenden Situation soll keine direkte Sonnenstrahlung ($I=0$) auf den Menschen fallen, was bei dem hohen mittleren Bewölkungsgrad am Nachmittag in den Tropen plausibel erscheint. Bei direkter Sonnenstrahlung würde sich die berechnete thermische Belastung in Form von höheren T_{sk} , WS, oder b natürlich noch erhöhen.

Die diffuse Himmelsstrahlung wurde nach Dirmhirn (1964) für eine geschlossene Cumulusbewölkung zu $D=140\text{ W/m}^2$ angesetzt. Die kurzwellige Reflexstrahlung r' wurde wegen der zu erwartenden kleinen Albedo und der dadurch geringen Bedeutung für den Strahlungssaldo eines Menschen nicht berücksichtigt. Für die atmosphärische Gegenstrahlung A' ergaben sich nach (113) 406 W/m^2 . Aus (19) berechnen sich die mittleren Strahlungstemperaturen für eine kurzwellige Absorptionszahl der Körperoberfläche von $\alpha_{ir}=0,7$ zu $34,2^{\circ}\text{C}$ und für $\alpha_{ir}=0,4$ zu $30,8^{\circ}\text{C}$.

Mit den folgenden Berechnungen für die Simulation "Tropen" sollen die Energieflüsse und die entsprechenden physiologischen Parameter für sitzende (Abb.50-52) und leicht arbeitende (Abb.53) Personen in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung an Beispielen quantifiziert werden.

Nach Abbildung 50 sind die mittleren Hauttemperaturen T_{sk} der 4 Personen nur in geringem Maße von I_{cl} abhängig. Sie liegen für $I_{cl}=1,0\text{ clo}$ bei den männlichen Personen um $0,1\text{ K}$ und bei den weiblichen Personen um $0,2$ bis $0,3\text{ K}$ höher als bei $I_{cl}=0,1\text{ clo}$.

Betrachtet man dagegen den Hautbenetzungsgrad b in Abhängigkeit von I_{cl} , so ist eine annähernd lineare Zunahme mit steigendem Wärmedurchgangswiderstand festzustellen. Die Hautbenetzung b des jungen Mannes (Pers.2) nimmt zum Beispiel von 13% bei $I_{cl}=0,1\text{ clo}$ auf 35% bei $1,0\text{ clo}$ zu, und liegt im gesamten Bereich über der der anderen Personen.

Eine geringere Zunahme ist beim Wasserverlust WS durch Transpiration (Abb.52) zu verzeichnen. Er nimmt beim jungen Mann (Pers.2) im dargestellten Intervall von I_{cl} von 98 g/h auf 127 g/h zu. Eine Zusammenchau der Abbildungen 50-52 macht deutlich, daß in feuchtropischen Klimaten möglichst wenig Kleidung ein Optimum an thermischer Behaglichkeit bedeutet, da sowohl die mittlere Hauttemperatur als auch der Wasserverlust und die Hautbenetzung mit steigender Bekleidungsisolation zunehmen. Für den sitzenden Menschen kann das hier betrachtete Tropenklima im gesamten dargestellten I_{cl} -Intervall als erträglich angesehen werden, wenn auch die Komfortbewertung in allen Fällen, primär wegen der über dem Optimum liegenden Hauttemperatur, eine "zu warme" Umgebung ergibt.

Der Wasserverlust WR über die Atmung beträgt wegen der sehr hohen Luftfeuchtigkeit für die sitzenden Personen nur 7 - 10 g/h.

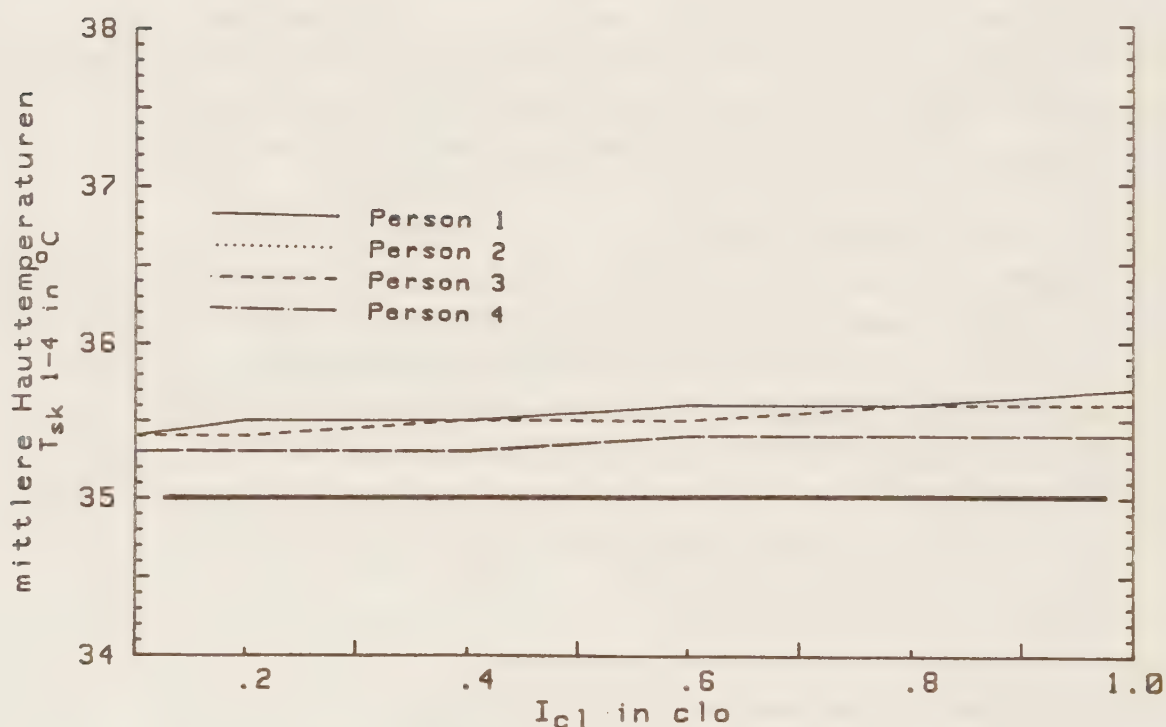


Abb.50: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in °C von 4 Personen im Tropenklima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung (ruhig sitzend, $\alpha_{ir}=0,7$).

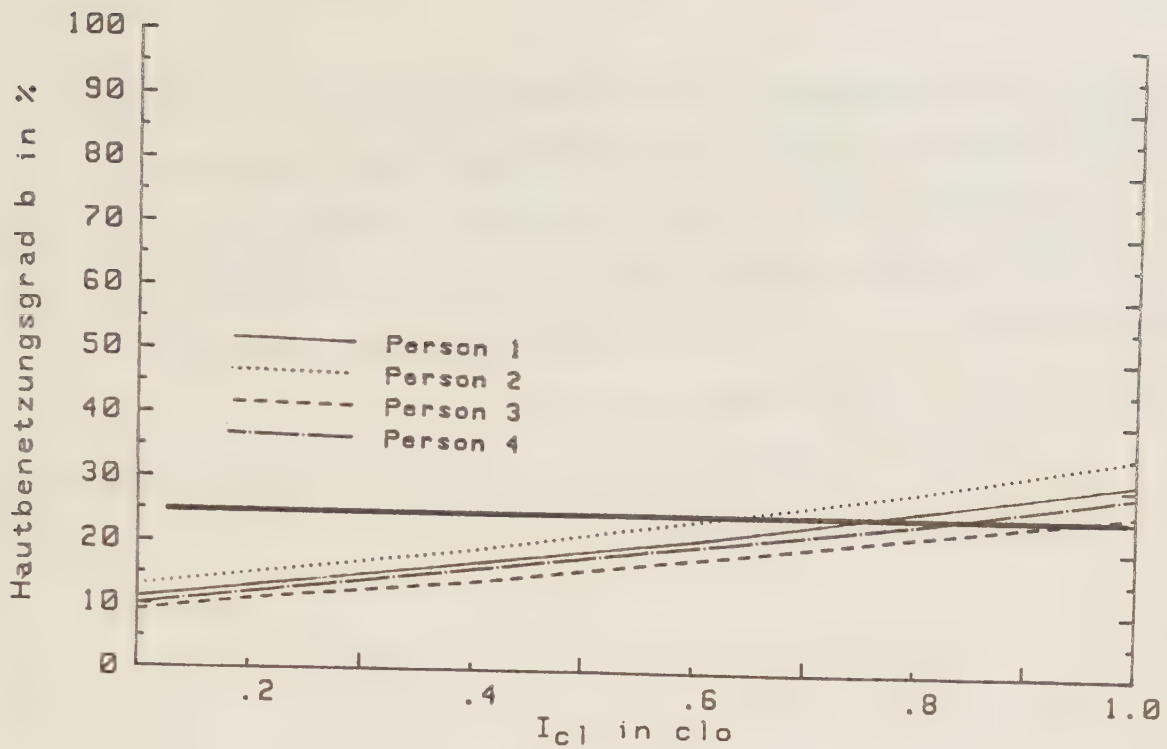


Abb.51: Hautbenetzungsgrad b von 4 Personen im Tropenklima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Bekleidung (ruhig sitzend, $\alpha_{ir}=0,7$)

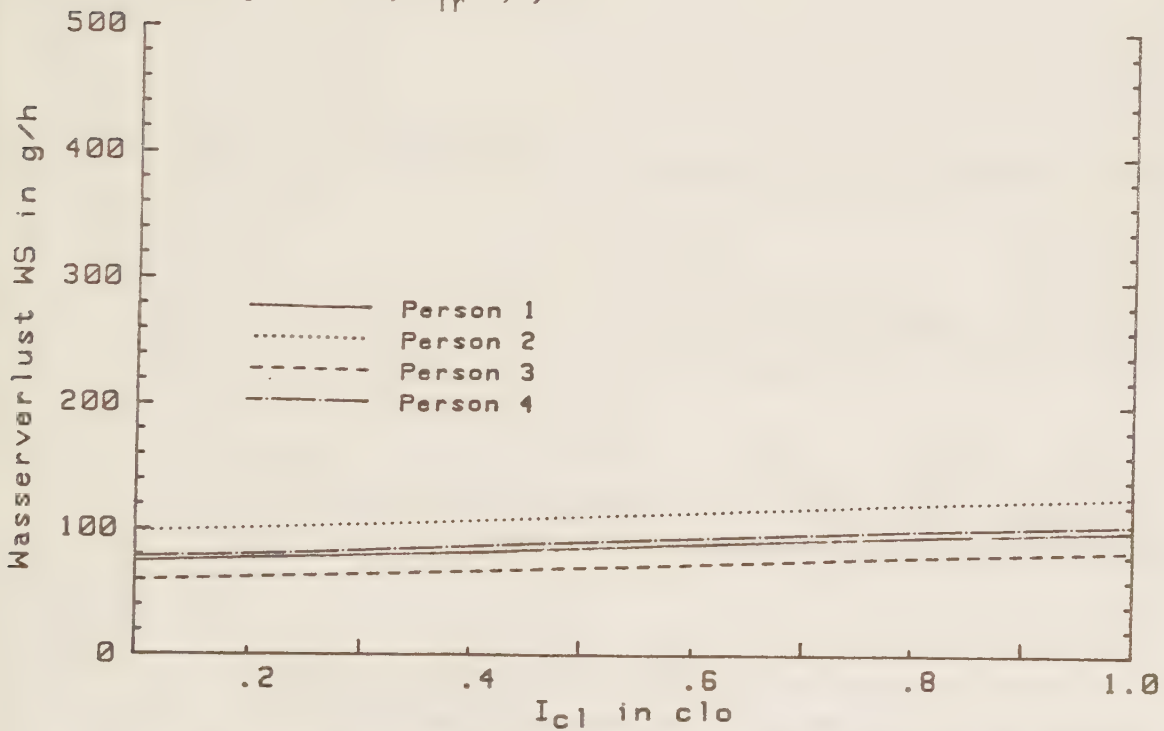


Abb.52: Wasserverlust WS durch Transpiration von 4 Personen im Tropenklima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung (ruhig sitzend, $\alpha_{ir}=0,7$)

Die Erträglichkeit des Tropenklimas ändert sich aber sehr schnell, wenn die Aktivität gesteigert wird. Wie in der Abbildung 53 dargestellt, ergibt sich für einen leicht arbeitenden Mann ($AKT=200\text{ W}$) bei $I_{cl}=1,0\text{ clo}$ eine Hautbenetzung von 100%. Sie bedeutet, daß selbst bei vermehrter Transpiration nicht mehr Energie durch Verdunstung des Schweißes abgegeben werden kann. Eine weitere Erhöhung der Aktivität oder der Bekleidungsisolations führt daher zu einer Steigerung der Haut- und Kerntemperaturen und damit zu einem Hitzekollaps.

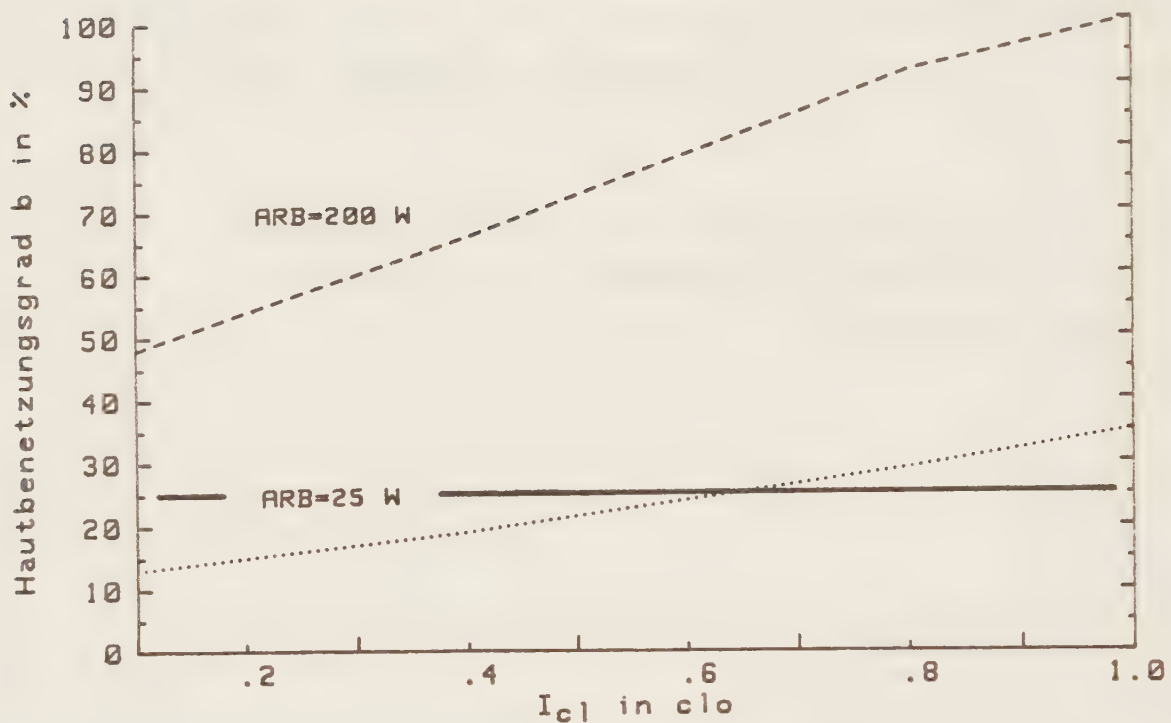


Abb.53: Hautbenetzungsgrad b der Person 2 im Tropenklima in Abhängigkeit von I_{cl} bei ruhigem Sitzen ($AKT=25\text{ W}$) und leichter Arbeit ($AKT=200\text{ W}$) und $\alpha_{ir}=0,7$.

Trotz der schlechten Austauschbedingungen für Wasserdampf stellt der latente Wärmefluß E_{sw} durch Transpiration hier den größten Energiefluß zur Entwärmung des Körpers dar. An zweiter Stelle steht der Fluß fühlbarer Wärme L (Tab.21 und 22 im Anhang).

Abschließend zu Abschnitt 7.3 kann das Fazit gezogen werden: Es gibt auf der Erde keine Klimazone, in der sich der Mensch nicht über längere Zeit (mehrere Stunden) aufhalten kann, vorausgesetzt er kleidet sich in geeigneter Weise. Eine Einschränkung dieser Freiheit liegt lediglich im Spektrum der Aktivitäten, die im Falle des polaren Klimas nicht zu tief, und im Falle des tropischen und subtropischen Klimas nicht zu hoch angesetzt werden dürfen.

Besonders bei den in der heutigen Zeit in Mode geratenen Fernreisen in subtropische oder tropische Regionen sollten sich die Reisenden in den ersten Tagen ihre Anwesenheit daher nicht zu sehr anstrengen, weil eine Akklimatisation zu vermehrter Schweißsekretion mehrere Tage bis zu Wochen dauert.

7.3.4. Der Mensch im Höhenklima

Der Höheneinfluß auf den menschlichen Energiehaushalt wurde schon von Hörschele (1976) und Baumgartner (1977) diskutiert. Da hier jedoch teilweise neue Ansätze zur Berechnung der Wärmeflüsse abgeleitet wurden, sollen damit die Auswirkungen des Höhenklimas auf die Energetik eines Menschen erneut untersucht werden.

Bei Veränderung des Höhenniveaus ändert sich neben den klassischen "thermischen" Parametern wie der Lufttemperatur T_a , des Dampfdruckes e_1 , der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} und der Windgeschwindigkeit v auch der Luftdruck p . Eine Luftdruckänderung bei Konstanz der anderen Parameter beeinflusst den latenten Wärmeverlust über die Respiration E_{Re1} , den konvektiven Wärmefluß L und die Schweißverdunstung E_{Sw} , wenn die potentielle Schweißverdunstung kleiner als die durch die körpereigene Schweißsekretion zur Verfügung gestellte Wassermenge ist. Alle anderen Terme der Energiebilanzgleichung hängen nicht direkt vom Luftdruck ab.

Im folgenden wird der Einfluß des Luftdruckes auf die genannten Wärmeflüsse diskutiert. Zuerst soll dies für den latenten Wärmefluß in die Atemluft geschehen. Der relative latente Wärmefluß in die Atemluft (E_{Re1}/E_{Re1}^0) in Abhängigkeit von der Höhe über NN ist in der Abbildung 54 dargestellt. E_{Re1}^0 entspricht dabei dem Wärmefluß in Meeresniveau ($p=1013,25$ mb). Die den verschiedenen Höhen entsprechenden Luftdruckwerte wurden als die einer Normatmosphäre (DIN 5450) angenommen. Eine Höhe von 3000 m über NN entspricht z.B. einem Luftdruck von 701,1 mb. Aus der Abbildung 54 geht ein deutlicher Anstieg des latenten Wärmeflusses in die Atemluft mit sinkendem Luftdruck hervor. In einer Höhe von 3000 m ist er bei gleicher durch die Atemwege fließender Masse an Luft um 45% höher als im Meeresniveau.

Nach Jungmann (1964) nimmt sowohl der Grundumsatz als auch der Arbeitsumsatz eines Menschen mit der Höhe zu, was zu einer erhöhten Ventilationsmasse an Atemluft führt. Dadurch kann sich der Energiefluß in die Atemluft noch zusätzlich erhöhen (Baumgartner et al., 1974).

Neben dem Luftdruck p üben der Dampfdruck der Umgebungsluft e_1 und die Lufttemperatur T_a , die jeweils auch eine charakteristische Höhenabhängigkeit aufweisen, ebenso einen Einfluß auf den Wärmeverlust E_{Re1} aus.

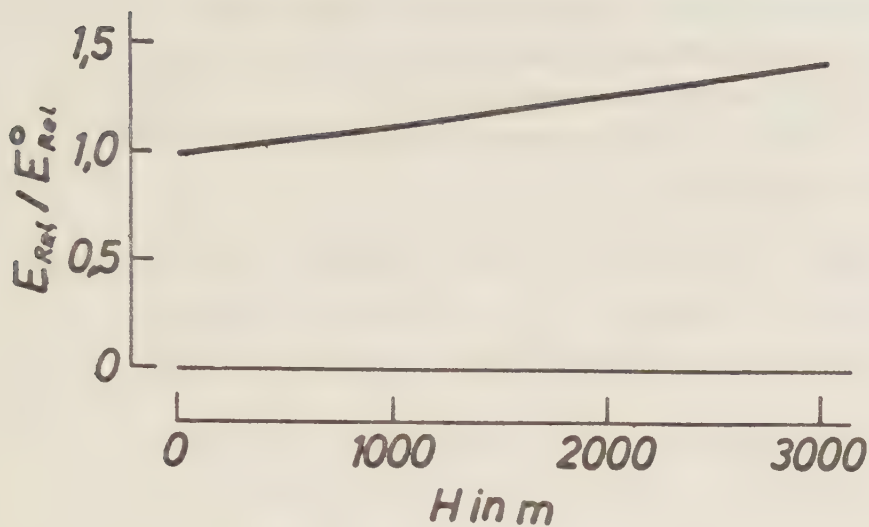


Abb.54: Relativer latenter Wärmefluß in die Atemluft in Abhängigkeit von der Höhe H über NN bei sonst konstanten Bedingungen.

Der konvektive Wärmefluß L ist eine Funktion des Luftdruckes p , da der Wärmeübergangskoeffizient h_c vom Luftdruck abhängt. In der Abbildung 55 ist der relative konvektive Wärmefluß (L/L^0) in Abhängigkeit von der Höhe über NN dargestellt. Der konvektive Wärmefluß L ist in einer Höhe von 3000 m um 18 % geringer als im Meeresniveau, wenn sonst alle Größen als konstant angenommen werden.

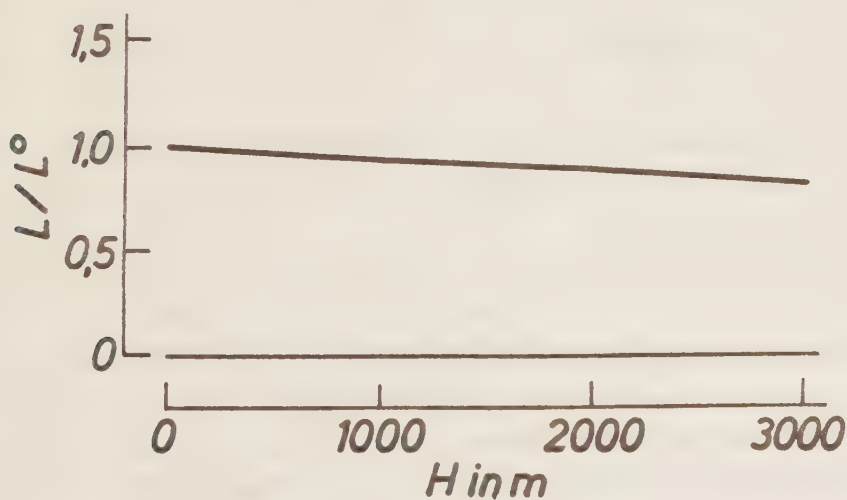


Abb.55: Relativer konvektiver Wärmefluß in Abhängigkeit von der Höhe über NN bei sonst konstanten Bedingungen.

Der Energieverlust des Körpers durch Verdunstung von Schweiß hängt dann vom Luftdruck p ab, wenn der Körper eine Schweißrate aufweist, die größer als die potentiell verdunstende Menge an Wasser ist. Liegt die Schweißproduktion darunter, so kann unabhängig vom Luftdruck immer die gesamte Schweißmenge verdunsten.

In der Abbildung 56 ist die relative potentielle Schweißverdunstung ($E_{\text{pot}}/E_{\text{pot}}^0$) in Abhängigkeit von der Höhe über NN dargestellt. Danach liegt die potentielle Schweißverdunstung E_{pot} - bei Vernachlässigung eines variablen Einflusses der Bekleidung auf sie - in 3000 m um 19% höher als in Seehöhe.

Über die potentielle Schweißverdunstung ist indirekt auch der Energieverlust durch Wasserdampfdiffusion mit der Höhe variabel, da nur durch die nicht benetzten Hautpartien eine Diffusion möglich ist.

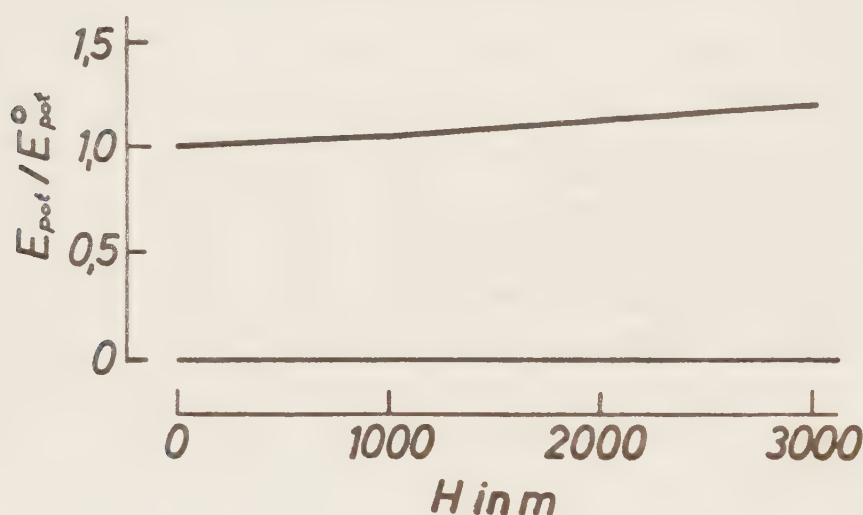


Abb.56: Relative potentielle Schweißverdunstung in Abhängigkeit von der Höhe über NN bei sonst konstanten Bedingungen und Vernachlässigung eines Kleidungseinflusses.

In den vorangegangenen Betrachtungen wurden die meteorologischen Parameter wie die Lufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur, die Windgeschwindigkeit und der Dampfdruck konstant gehalten, um den Einfluß des Luftdruckes auf die einzelnen Wärmeflüsse zu veranschaulichen. In der Realität kann der Höheneinfluß auf die Energiebilanz jedoch nicht isoliert betrachtet werden, da die Wärmeflüsse über Haut-

temperatur und Schweißrate in gegenseitiger Abhängigkeit stehen. So kann sich z.B. ein Steigen der latenten Wärmeflüsse durch niedrigere Haut- und Kleidungstemperaturen auf den konvektiven Wärmefluß und auf die Nettostrahlung der Körperoberfläche auswirken. McCutchan (1956) fand z.B. in einer experimentellen Untersuchung, daß, wegen der genannten Zusammenhänge, bei einer Verminderung des Luftdruckes sowohl die Kerntemperaturen als auch die Hauttemperaturen sanken.

Um der Realität nahe zu kommen, muß daher die **gesamte** Energiebilanz in Abhängigkeit von den meteorologischen Parametern betrachtet werden.

Tab.22: Meteorologischer Datensatz im Vergleich Tal/ Berglage für 3 verschiedene klare Tage zur Mittagszeit.

Frühling					
	T_a (°C)	T_{mrt} (°C)	e_l (mb)	v (m/s)	p (mb)
Tal	15,0	36,3	10,0	2,0	988,0
Berg	5,0	33,5	5,0	2,0	795,0
Sommer					
	T_a (°C)	T_{mrt} (°C)	e_l (mb)	v (m/s)	p (mb)
Tal	30,0	48,6	21,2	2,0	988,0
Berg	20,0	41,5	10,6	2,0	795,0
Winter					
	T_a (°C)	T_{mrt} (°C)	e_l (mb)	v (m/s)	p (mb)
Tal	0,0	29,6	5,0	2,0	988,0
Berg	-8,0	31,8	2,0	2,0	795,0

Da sich neben dem Luftdruck p auch die anderen meteorologischen Parameter mit zunehmender Höhe in charakteristischer Weise ändern, wurden hier plausible Datensätze für eine Tallage (200 m über NN) und eine Berglage (2000 m über NN) verwendet.

Die Daten beschreiben für 3 verschiedene Jahreszeiten jeweils einen klaren Tag zur Mittagszeit. Sie sind in Tabelle 22 aufgelistet.

Die zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperaturen T_{mrt} benötigten Strahlungswerte wurden nach Dirmhirn (1964), die Oberflächentemperaturen des Bodens in Anlehnung an Meßdaten von "Stadtklima Bayern" (Baumgartner et al., 1983) und die Lufttemperaturen T_a und die Dampfdrucke e_1 nach Baumgartner (1980) angesetzt.

Die in der Tabelle 22 enthaltenen mittleren Strahlungstemperaturen T_{mrt} liegen in allen Jahreszeiten weit über der Lufttemperatur T_a . Im Winter ist T_{mrt} in der Berglage wegen der höheren kurzwelligen Strahlungsfußdichten höher als in der Tallage; in den anderen Jahreszeiten führt der Einfluß der Oberflächentemperaturen des Bodens im Tal zu höheren mittleren Strahlungstemperaturen.

Am konkreten Beispiel des vorgestellten Datensatzes (Tab.22) wurden jeweils für eine junge Frau (Person 1) und einen jungen Mann (Person 2) Berechnungen der einzelnen Wärmeflüsse und der sich einstellenden thermophysiologischen Größen durchgeführt. Als Aktivität der Personen wurde Wandern (4 km/h) auf holprigem Untergrund angenommen. Die Ergebnisse aus diesen Berechnungen sind in den Tabellen 23-25 dargestellt.

In der Tabelle 23 sind diese Größen für einen Frühlingstag aufgelistet. Die Nettostrahlung des Körpers Q ist dabei wegen der hohen mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} jeweils positiv und führt daher neben der inneren Wärme H zu einem zusätzlichen Energiegewinn. Der bedeutendste Wärmefluß zur Entwärmung des Körpers ist der konvektive Wärmefluß L , der in der Berglage wegen der größeren Temperaturdifferenz zwischen der Körperoberfläche und der Umgebungsluft höher ist. Der latente Wärmefluß durch Schweißverdunstung E_{sw} ist dagegen in der Berglage geringer, was auf eine geringere Schweißsekretion zurückzuführen ist. Der Wärmefluß in die Atemluft E_{Re} und die Wasserdampfdiffusion E_D spielen hier für die Entwärmung eine untergeordnete Rolle.

Vor allem wegen der geringeren Schweißsekretion SW und dem niedrigeren Hautbenetzungsgrad b wird die Berglage thermisch günstiger als die Tallage erscheinen. Von den mittleren Hauttemperaturen T_{sk} sind bei den hier auftretenden Werten keine deutlichen Befindensunterschiede zu erwarten.

Vergleicht man die energetischen Werte von Tal- und Berglage für einen Sommertag (Tab.24), so fällt die große Bedeutung der Schweißverdunstung auf, die in der Tallage den größten Wärmeverlust darstellt. Durch die

erheblich höhere Schweißrate des Mannes (Pers.2) liegen seine mittleren Hauttemperaturen T_{sk} niedriger als die der Frau (Pers.1). Alle physiologischen Parameter weisen für die untersuchte Situation das Bergklima als komfortabler als das Talklima aus.

Tab.23: Wärmeflüsse und thermophysiologische Größen von 2 Personen im Vergleich Berg- und Tallage für einen Frühlingstag.
Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung $I_{cl}=1,0$ clo.
(Alle Wärmeflüsse in W, T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$, SW in g/h, b in %)

	H	Q	L	E_{Sw}	E_{Re}	E_D	T_{sk}	SW	b
Pers.1 Tal	309	88	-238	-116	-25	-18	34,8	172	23
Pers.2 Tal	389	107	-282	-163	-32	-19	34,4	243	28
Pers.1 Berg	309	104	-307	-57	-28	-21	33,0	84	9
Pers.2 Berg	389	127	-362	-96	-36	-22	32,3	143	14

Tab.24: Wärmeflüsse und thermophysiologische Größen von 2 Personen im Vergleich Berg- und Tallage für einen Sommertag.
Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung $I_{cl}=0,8$ clo.
(Alle Wärmeflüsse in W, T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$, SW in g/h, b in %)

	H	Q	L	E_{Sw}	E_{Re}	E_D	T_{sk}	SW	b
Pers.1 Tal	309	114	-123	-264	-27	-9	36,1	393	54
Pers.2 Tal	389	138	-142	-343	-33	-9	35,7	510	60
Pers.1 Berg	309	91	-200	-149	-33	-18	35,2	222	21
Pers.2 Berg	389	112	-235	-204	-41	-20	34,8	304	25

Im Winter (Tab.25) sprechen die physiologischen Parameter für größere Behaglichkeit im Tal, da sich die mittleren Hauttemperaturen T_{sk} in Berglage schon im Grenzbereich zur Unbehaglichkeit befinden. Die

Feuchtegrößen SW und b sind in der Wintersituation von untergeordneter Bedeutung. Der konvektive Wärmefluß L stellt den bei weitem größten Anteil an der Entwärmung dar. Er überkompensiert den Anstieg der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} mit der Höhe und führt zu den tieferen Hauttemperaturen in Berglage.

Tab.25: Wärmeflüsse und thermophysiologische Größen von 2 Personen im Vergleich Berg- und Tallage für einen Wintertag.
Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung $I_{cl}=1,5$ clo.
(Alle Wärmeflüsse in W, T_{sk} in °C, SW in g/h, b in %)

	H	Q	L	E_{Sw}	E_{Re}	E_D	T_{sk}	SW	b
Pers.1 Tal	309	149	-363	-53	-23	-19	32,5	79	14
Pers.2 Tal	389	180	-430	-90	-29	-20	31,9	134	21
Pers.1 Berg	309	199	-433	-29	-26	-20	31,0	43	7
Pers.2 Berg	389	239	-516	-57	-33	-22	30,7	84	11

Die in den vorangehenden Tabellen erläuterten Beispiele stellen eine komplexe Bewertungsmöglichkeit des Höhenklimas vor. Gleichzeitig sollte gezeigt werden, daß eine partielle Betrachtung des Höheneinflusses auf den Menschen, wie sie in den Abbildungen 54-56 durchgeführt wurde, zwar physikalisch sinnvoll sein kann, zur Bewertung des Energiehaushaltes jedoch nicht ausreichend ist.

Die pauschale Aussage von Barry (1981), daß das Höhenklima einen starken Stress für den Menschen bedeutet, ist sicher im thermischen Sinne nur für spezifische Wettersituationen gültig. Ein bedeutender Stressfaktor kann in großen Höhen nach Baumgartner (1977) durch Reaktionen des Stoffwechselchemismus auf die veränderten Partialdrucke von O_2 und CO_2 in der Umgebungsluft entstehen.

8 Schlußbetrachtung

Die Berechnungen für verschiedenartige Klimabedingungen haben gezeigt, daß der Mensch durch die Thermoregulation und die Homoiothermie kaum Einschränkungen seines Aufenthaltsortes unterliegt. Neben diesen körpermanenten Regelmechanismen ist der Mensch in der Lage, durch Wahl seines Wohnortes, seines Aufenthaltsortes, Wahl der Aktivität, Auswahl der Nahrung und Anpassung der Bekleidung an die thermischen Bedingungen seine Behaglichkeit zu optimieren. Gerade bei der Wahl der Kleidung treten oft die thermischen Bedürfnisse hinter anderen Gesichtspunkten zurück. So sind es oft traditionelle Bekleidungskonventionen, die zu einer aus thermischem Gesichtspunkt ungünstigen Kleidung, wie z.B. dem i.a. niedrigeren clo-Wert von Damenbekleidung führen. Auch weichen die thermischen Bedingungen am Ort, an dem die Kleidung für den Tag ausgewählt wird häufig von denen am Aufenthaltsort während des Tages ab.

Die Ergebnisse der Berechnungen haben gezeigt, daß zur Beurteilung der thermischen Umgebung eines Menschen eine pauschale Betrachtungsweise die z.B. nur einen "Durchschnittsmenschen" oder die mittleren klimatischen Verhältnisse einer Region berücksichtigt, wenig sinnvoll erscheint. Die individuellen Unterschiede sowie die mikroklimatischen Variationen sind dafür zu groß.

Da die hier im Modell berechneten Körpertemperaturen T_{sk} , T_{cl} und T_c und die Schweißrate SW auf teilweise noch verbesserungsbedürftigen empirischen Ansätzen beruhen, ist im einzelnen Fall nach Möglichkeit eine direkte Messung dieser Größen vorzuziehen. Eine experimentelle Verifikation des Modells ist geplant.

Die rechnerischen Ansätze gelten im strengen Sinne nur für Erwachsene, da bei Kindern und speziell bei Säuglingen (Hensel, 1955) thermoregulatorische Besonderheiten vorliegen.

Die Quantifizierung der energetischen Veränderungen beim schnellen Übergang von einem Mikroklima in ein anderes, wie z.B. beim Verlassen eines geschlossenen Raumes, kann auch aus dem vorgestellten Modell durch Berücksichtigung des dann sehr bedeutenden Speicherwärmeflusses S abgeleitet werden. Dies soll, ähnlich wie von Theves et al. (1981) erläutert, in einer späteren Arbeit erfolgen.

Bei den Berechnungen zu Kapitel 7 wurde deutlich, daß die meteorologischen Daten, wie sie gewöhnlich im synoptischen- und im Klimadienst erhoben werden, oft für eine biometeorologische Bewertung unzureichend sind. Dies gilt vor allem für die in die Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur eingehenden Strahlungsflüsse zum Menschen.

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb.1 : Energieflüsse des menschlichen Körpers
- Abb.2 : Grundumsätze GRU von Mann und Frau in Abhängigkeit von der Körpergröße GR (nach Kleiber, 1967 und Fanger, 1972).
AL= 30 Jahre, GE= 60 kg bzw. 80 kg.
- Abb.3 : Grundumsätze GRU von Mann und Frau in Abhängigkeit von der Körpermasse GE (nach Kleiber, 1967 und Fanger, 1972).
AL= 30 Jahre, GR= 1,60 m bzw. 1,80 m.
- Abb.4 : Grundumsätze GRU von Mann und Frau in Abhängigkeit vom Alter AL (nach Kleiber, 1967 und Fanger, 1972).
GR= 1,60 m bzw. 1,80 m, GE= 60 kg bzw. 80 kg.
- Abb.5 : Konvektive Wärmeübergangszahlen h_c verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v für einen **stehenden** Menschen bei kleinen Windgeschwindigkeiten.
- Abb.6 : Konvektive Wärmeübergangszahlen h_c verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v für einen **stehenden** Menschen bei höheren Windgeschwindigkeiten.
- Abb.7 : Konvektive Wärmeübergangszahlen h_c verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v für einen **sitzenden** Menschen bei kleinen Windgeschwindigkeiten.
- Abb.8 : Konvektive Wärmeübergangszahlen h_c verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v für einen **sitzenden** Menschen bei höheren Windgeschwindigkeiten.
- Abb.9 : Konvektive Wärmeübergangszahlen h_c verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit v_r für einen **gehenden** Menschen.
- Abb.10: Schichtenmodell zum konduktiven Wärmefuß am menschlichen Körper (Beispiel für einen liegenden Menschen).
- Abb.11: Qualitative Darstellung der Schweißrate SW eines Menschen in Abhängigkeit von dessen mittlerer Hauttemperatur T_{sk} (nach Stolwijk et al., 1966)
- Abb.12: Horizontogramm einer Horizontüberhöhung von 45 Grad über einen Azimut von 90 Grad.
- Abb.13: Vergleich des Atemwärmeflusses E_{Re} nach Fanger (1972) und nach Höppe (1979) in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a .
- Abb.14: Atemwärmefluß E_{Re} bei Mund- und Nasenatmung in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a .

- Abb.15: Fühlbarer- (E_{Ref}) und latenter (E_{Rel}) Anteil des Atemwärmeflusses bei Nasenatmung in Abhängigkeit von T_a .
- Abb.16: Fühlbarer- (E_{Ref}) und latenter (E_{Rel}) Anteil des Atemwärmeflusses bei Nasenatmung in Abhängigkeit vom Dampfdruck e_1 .
- Abb.17: Zylindrisches Modell für den Wärmefluß F_{KL} von der Haut zur Kleidungs Oberfläche.
- Abb.18: Abhängigkeit des Wärmedurchgangswiderstandes I_{cl} verschiedener Bekleidungsensembles eines stehenden Menschen von der Windgeschwindigkeit v (nach Umbach, 1982)
- Abb.19: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH am Beispiel eines ruhig stehenden Mannes ($M=132$ W); $T_a=T_{mrt}=30^{\circ}\text{C}$, $v=0,5$ m/s.
- Abb.20: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH am Beispiel eines ruhig stehenden Mannes ($M=132$ W); $T_a=T_{mrt}=10^{\circ}\text{C}$, $v=0,5$ m/s.
- Abb.21: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a am Beispiel eines ruhig stehenden Mannes ($M=132$ W); $RH=50\%$, $T_{mrt}=T_a$, $v=0,5$ m/s.
- Abb.22: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH am Beispiel eines hart arbeitenden Mannes ($M=482$ W); $T_a=T_{mrt}=30^{\circ}\text{C}$, $v=0,5$ m/s.
- Abb.23: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a am Beispiel eines hart arbeitenden Mannes ($M=482$ W); $RH=50\%$, $T_a=T_{mrt}$, $v=0,5$ m/s.
- Abb.24: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a am Beispiel einer hart arbeitenden Frau ($M=459$ W); $RH=50\%$, $T_{mrt}=T_a$, $v=0,5$ m/s.
- Abb.25: Wasserverlust des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH am Beispiel einer hart arbeitenden Frau ($M=459$ W); $T_a=T_{mrt}=30^{\circ}\text{C}$, $v=0,5$ m/s.
- Abb.26; Vergleich der Schweißproduktion WS eines Mannes und einer Frau bei gleicher spezifischer metabolischer Rate in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH; $T_a = T_{mrt} = 20^{\circ}\text{C}$, $v=0,5$ m/s.
- Abb.27: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a ($T_{mrt}=T_a$, $RH=50\%$, $v=0,1$ m/s) bei ruhigem Sitzen ($AKT=25$ W) im Raumklima.

- Abb.28: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a ($T_{mrt}=T_a$, $RH=50\%$, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.
- Abb.29: Schweißraten WS von 4 Personen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a ($T_{mrt}=T_a$, $RH=50\%$, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.
- Abb.30: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit vom Dampfdruck e_1 ($T_a=T_{mrt}=20^{\circ}\text{C}$, $v=0,1$ m/s) bei ruhigem Sitzen (AKT=25 W) im Raumklima.
- Abb.31: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit vom Dampfdruck e_1 ($T_a=T_{mrt}=20^{\circ}\text{C}$, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.
- Abb.32: Schweißraten WS von 4 Personen in Abhängigkeit vom Dampfdruck e_1 ($T_a=T_{mrt}=20^{\circ}\text{C}$, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.
- Abb.33: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v ($T_a=T_{mrt}=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12$ mb) bei ruhigem Sitzen (AKT=25 W) im Raumklima.
- Abb.34: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v ($T_a=T_{mrt}=20^{\circ}\text{C}$; $e_1=12$ mb) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.
- Abb.35: Schweißraten WS von 4 Personen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v ($T_a=T_{mrt}=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12$ mb) bei Büroarbeit (AKT= 110 W) im Raumklima.
- Abb.36: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} ($T_a=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12$ mb, $v=0,1$ m/s) bei ruhigem Sitzen (AKT=25 W) im Raumklima.
- Abb.37: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Personen in Abhängigkeit von der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} ($T_a=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12$ mb, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT=110 W) im Raumklima.
- Abb.38: Schweißraten WS von 4 Personen in Abhängigkeit von der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} ($T_a=20^{\circ}\text{C}$, $e_1=12$ mb, $v=0,1$ m/s) bei Büroarbeit (AKT= 110 W) im Raumklima.
- Abb.39: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} von 4 Individuen im Ruhestadium bei unterschiedlicher Körperbedeckung (a-d) für das Oberbett Typ 2 und Rückenlage ($T_a=18^{\circ}\text{C}$).

- Abb.40: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ einer jungen Frau (Pers.1) im Ruhestadium mit verschiedenartigen Oberbettmaterialien in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a bei Rückenlage und einer Körperbedeckung (a) bis zum Kopf.
- Abb.41: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ einer jungen Frau (Pers.1) im Ruhestadium mit verschiedenartigen Oberbettmaterialien in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a bei Rückenlage und einer Körperbedeckung (b) mit unbedecktem Kopf und Arm.
- Abb.42: Hautbenetzungsgrad b von 4 Individuen im Ruhestadium in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a bei Rückenlage, der Bedeckungsart a und dem Bettdeckentyp 1.
- Abb.43: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ von 4 Personen im Polar-klima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Bekleidung.
- Abb.44: Energieflüsse vom Körper eines jungen Mannes (Pers.2) im Polar-klima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung ($H=419\text{ W}$).
- Abb.45: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ von 4 Personen im Sub-tropen-klima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung ($\alpha_{ir}=0,7$, ruhig stehend).
- Abb.46: Wasserverluste WS durch Transpiration von 4 Personen im Sub-tropen-klima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung ($\alpha_{ir}=0,7$, ruhig stehend).
- Abb.47: Hautbenetzungsgrad b von 4 Personen im Subtropen-klima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung ($\alpha_{ir}=0,7$, ruhig stehend).
- Abb.48: Energieflüsse L , Q , E , E vom Körper eines jungen Mannes im Subtropen-klima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung ($\alpha_{ir}=0,7$, ruhig stehend).
- Abb.49: Mittlere Hauttemperatur T_{sk} von Pers.2 im Subtropen-klima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} bei dunkler ($\alpha_{ir}=0,7$) und heller ($\alpha_{ir}=0,4$) Bekleidung (ruhig stehend).
- Abb.50: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ von 4 Personen im Tropen-klima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung (ruhig sitzend, $\alpha_{ir}=0,7$).
- Abb.51: Hautbenetzungsgrad b von 4 Personen im Tropen-klima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Bekleidung (ruhig sitzend, $\alpha_{ir}=0,7$).

- Abb.52: Wasserverlust WS durch Transpiration von 4 Personen im Tropen-
klima in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der
Kleidung (ruhig sitzend, $\alpha_{ir}=0,7$)
- Abb.53: Hautbenetzungsgrad b der Person 2 im Tropenklima in Abhängig-
keit von I_{cl} bei ruhigem Sitzen (AKT=25 W) und leichter Ar-
beit (AKT=200 W) und $\alpha_{ir}=0,7$.
- Abb.54: Relativer latenter Wärmefluß in die Atemluft in Abhängigkeit
von der Höhe H über NN bei sonst konstanten Bedingungen.
- Abb.55: Relativer konvektiver Wärmefluß in Abhängigkeit von der Höhe
über NN bei sonst konstanten Bedingungen.
- Abb.56: Relative potentielle Schweißverdunstung in Abhängigkeit von der
Höhe über NN bei sonst konstanten Bedingungen und Vernachlässi-
gung eines Kleidungseinflusses.

Verzeichnis der Tabellen

- Tab.1 : Kalorischer Wert KAL eines Liters des verbrauchten Sauerstoffes bei verschiedenen respiratorischen Quotienten RQ nach Lehmann (1953).
- Tab.2 : Verteilung des Grundumsatzes im Körper eines 35 jähr. ruhenden Mannes mit einer Körpermasse von 75 kg und einer Körpergröße von 1,70 m auf die wesentlichen Organe (nach Lehmann, 1953).
- Tab.3 : Der Aktivitätsumsatz AKT und die metabolischen Raten M zweier Personen bei verschiedenen Tätigkeiten (nach Spitzer et al, 1982; Hettinger et al., 1980; Hettinger, 1982; Kleiber, 1967)
- Tab.4 : Der Wirkungsgrad η der nach außen geleisteten Arbeit bei verschiedenen Aktivitäten (nach Fanger, 1972).
- Tab.5 : Ansätze für die Wärmeübergangszahl h_c in $W m^{-2}K^{-1}$ bei der Konvektion für verschiedene Körperhaltungen (v in m/s, T_{cl} und T_a in $^{\circ}C$)
- Tab.6 : Oberflächenanteile einzelner Körperteile an der Gesamtkörperoberfläche (nach Umbach, 1982)
- Tab.7 : Vergrößerungsfaktor der Oberfläche f_{cl} in Abhängigkeit von Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung I_{cl} nach Fanger (1972).
- Tab.8 : Anteil der durch Kleidung bedeckten Hautoberfläche an der gesamten Hautoberfläche A_{Du} bei verschiedener Bekleidung.
- Tab.9 : Wasserdampfdiffusionswiderstand R_D verschiedenartiger Bekleidungsarten nach Mecheels et al. (1976) beim Gehen.
- Tab.10: Benetzungsgrad der Haut b in Abhängigkeit von der mittleren Hauttemperatur T_{sk} (Burt et al., 1982).
- Tab.11: Absorptionskoeffizienten α_{cl} verschiedener Bekleidungsstücke für solare Strahlung.
- Tab.12: Projektionsfaktor f_p als Funktion der Sonnenhöhe h (nach Fanger, 1972)
- Tab.13: Bekleidungsfaktor Y bei verschiedenen Wärmedurchgangswiderständen der Kleidung (I_{cl}).
- Tab.14: Effektiver Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} einzelner Kleidungsstücke nach Sprague et al. (1974).
- Tab.15: Wärmedurchgangswiderstände I_{cl} (in $K m^2W^{-1}$) verschiedener Bekleidungstypen mit den dazugehörigen Regressionskoeffizienten a und b der Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v und das Bestimmtheitsmaß r^2 ($r^2 > 0,60$ statistisch signifikant) nach Umbach (1982).

- Tab.16: Personenbezogene Eingangsgrößen zur Berechnung der Energieflüsse von 4 verschiedenen Individuen
- Tab.17: Thermische und hygrische Eigenschaften von verschiedenen Oberbettmaterialien (Typ 1-3) nach Müller-Limmroth (1977)
- Tab.18: Mittlere Hauttemperaturen T_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ von 4 Individuen im Ruhestadium mit verschiedenartigen Oberbettmaterialien bei Rückenlage (Seitenlage) und einer Körperbedeckung (a) bis zum Kopf ($T_a=18^{\circ}\text{C}$)
- Tab.19: Mittlerer Wasserverlust durch Transpiration WS (g/h) von 4 Personen im Ruhestadium mit verschiedenartigen Oberbettmaterialien bei Rückenlage (Seitenlage) und einer Körperbedeckung (a) bis zum Kopf ($T_a=18^{\circ}\text{C}$).
- Tab.20: Optimale Schlafräumtemperaturen T_a ($^{\circ}\text{C}$) von 4 Personen im Ruhestadium mit verschiedenen Bettdeckentypen (Tab.17) bei den Bedeckungsarten a (b) und Rückenlage.
- Tab.21: Mittlere Strahlungstemperaturen T_{mrt} für die Simulation "Subtropen".
- Tab.22: Meteorologischer Datensatz im Vergleich Tal/ Berglage für 3 verschiedene klare Tage zur Mittagszeit.
- Tab.23: Wärme-flüsse und thermophysiologische Größen von 2 Personen im Vergleich Berg- und Tallage für einen Frühlingstag. Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung $I_{cl}=1,0 \text{ clo}$.
- Tab.24: Wärme-flüsse und thermophysiologische Größen von 2 Personen im Vergleich Berg- und Tallage für einen Sommertag. Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung $I_{cl}=0,8 \text{ clo}$.
- Tab.25: Wärme-flüsse und thermophysiologische Größen von 2 Personen im Vergleich Berg- und Tallage für einen Wintertag. Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung $I_{cl}=1,5 \text{ clo}$.

Literatur

- Abel, H., Baumgartner, A., Donle, W., 1977: Energie und Wasserumsätze bei der Atmung. Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr.28.
- Abel, H., Baumgartner, A., Donle, W., 1979: Klassifikationsversuche von Erkrankungszahlen. Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr.37.
- Abel, H., Baumgartner, A., Donle, W., 1980: Jahreszeit und Witterung im Krankheitsgeschehen. Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr.40.
- Aikas, E., Piironen, P., 1963: Thermal Exchanges of the Human Body in extreme Heat. Tech. Rep. No. AMRL-TDR-63-86, Wright - Patterson Air Force Base, Ohio.
- Albrecht, F., 1940: Untersuchungen über den Wärmehaushalt der Erdoberfläche in verschiedenen Klimagebieten. Wissenschaftliche Abhandlungen des Reichsamtes für Wetterdienst, Band VIII, Springer, Berlin.
- Aschoff, J. D., 1971: Temperaturregulation. In: Gauer-Kramer-Jung, Physiologie des Menschen, 2, Urban und Schwarzenberg, München.
- Atkins, A. R., Wyndham, C. H., 1969: A Study of Temperature Regulation in the Human Body with the Aid of an Analogue Computer. Pflügers Archiv, 37, 104-113.
- Auliciems, A., 1981: Psycho-Physiological Criteria for Global Zones of Building Design. Proc. of the 9. Int. Congr. Biometeor., Osnabrück.
- Auliciems, A., 1981: Towards a Psycho-Physiological Model of Thermal Perception. Int. J. of Biometeor., 25, 2, 109-122.
- Axelson, O., 1974: Heat Stress in Forest Work. Food and Agriculture Organisations of the United Nations, Rom.
- Azer, N. Z., Hsu, S., 1977: The Prediction of Thermal Sensation from a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. ASHRAE Trans., 83, 1, 88-102.
- Baldia, P. W., 1974: Die natürliche Klimatisierung von Unterrichtsräumen. Diplomarbeit, Institut f. Hochbau und Entwerfen 1, TH Wien.
- Banjeree, M. R., Elizondo, R., Bullard, R. W., 1969: Reflex Responses of Human Sweat Glands to Different Rates of Skin Cooling. J. Appl. Physiol., 26, 787-792.
- Barry, R., 1981: Mountain Weather and Climate. Methuen, London - New York.
- Baumgartner, A., Abel, H., Donle, W., 1974: Die Energetik der Atmung

- im Gebirge. Tagungsbericht XII. Int. Tagung alpine Meteorologie (Sarajevo 1972), Belgrad.
- Baumgartner, A., 1977: Gebirgsklima und Höhenstufung. In: Die Welt der Gebirge. Verlag C. J. Bucher, Luzern - Frankfurt.
- Baumgartner, A., 1980: Mountain Climates from a Perspective of Forest Growth. NZFS FRI Technical Paper Nr. 70.
- Baumgartner, A., Mayer, H., Bründl, W., Noack, E.-M., 1983: Kurzmitteilung Nr.5 zu STADTKLIMA BAYERN.
- Baumgartner, A., Mayer, H., Bründl, W., Noack, E.-M., 1983: Persönliche Mitteilungen.
- Belding, H. S., Hatch, T. F., 1956: Index for Evaluating Heat Stress in Terms of Resulting Physiological Strains. ASHRAE Trans., 62, 213-236.
- Benzinger, T. H., 1961: The Quantitative Mechanism and the Sensory Receptor Organ of Human Temperature Control in Warm Environment. Ann. Intern. Med., 54, 685-699.
- Berglund, L. G., Stolwijk, J. A. J., 1978: The Use of Human Thermoregulation in Assessing Acceptability of Complex Dynamic Thermal Environments. In: Energy Conservation Strategies in Buildings, Edt. J. A. J. Stolwijk, Yale University Printing Service, New Haven, Connecticut
- Billington, N.S., 1967: Building Physics: Heat. Pergamon Press, Oxford.
- Bligh, J., Hensel, H., 1974: Location of Thermoregulation Centres. In: Progress in Biometeorology, Vol.1, Part IB, Div.A, Ed. S.W.Tromp Swets und Zeitlinger, Amsterdam.
- Böll, K., 1978: Circumskriptes Schwitzen. Inaug. Diss., Fachber. Med. Julius Maximilians Universität, Würzburg.
- Bronswijk, J. E. M. H., Linskens, H. F., 1982: The Weather in some Beds and its Possible Consequences for Development of Allergenic Mite and Fungi. In: Bioengineering, Ed. Cena, K., Clark, J. A., Elsevier, Amsterdam.
- Büttner, K., 1934: Die Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion, Verdunstung und Strahlung in Bioklimatologie und Meteorologie. Veröffentlichungen des Preussischen Meteorologischen Institutes, 404, 10, Springer, Berlin.
- Büttner, K., 1938: Physikalische Bioklimatologie. Akademische Verlagsgesellschaft m.b.H., Leipzig.
- Büttner, K., 1965: On the Transfer Function of Human Skin. University of Washington, Department of Atmospheric Science and of Dermatology, Seattle, Washington.
- Burt, J. E., O'Rourke, P. A., Terjung, W. H., 1982a: The Relative In-

- fluence of Urban Climates on Outdoor Human Energy Budgets and Skin Temperatures, I. Modeling Considerations. *Int. J. Biometeor* 26, 1, 3-23.
- Burt, J. E., O'Rourke, P. A., Terjung, W. H., 1982b: Relative Influence of Selected Cloud Types and Amounts on Human Energy Budgets and Skin Temperatures. *Int. J. Biometeor.*, 26, 2, 99-114.
- Burt, J. E., O'Rourke, P. A., Terjung, W. H., 1982c : View Factors leading to the Simulation of Human Heat Stress and Radiant Exchange An Algorithm. *Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B*, 30, 321-331.
- Burton, A. C., 1935: The Average Temperature of the Tissues of the Body. *J. Nutr.*, 9, 246-280.
- Cabanac, M., 1981: Physiological Signals for Thermal Comfort. In: *Bioengineering*. Eds.: K. Cena, J. A. Clark, Elsevier, Amsterdam - London - New York.
- Caroll, D. P., Visser, J., 1966: Convection. *Rev. Sci. Instr.*, 37, 1174-1180.
- Candas, V., Libert, J. P., Vogt, J. J., Ehrhardt, J., 1979: Body Temperature During Sleep under Different Thermal Conditions. In: *Indoor Climate*, Ed. P. O. Fanger, O. Valbjorn, Danish Building Research Institute, Copenhagen.
- Chatonnet, J., Cabanac, M., 1965: The Perception of Thermal Comfort. *Int. J. Biometeor.*, 9, 2, 183-193.
- Clark, J. A., 1981: Human Skin Temperature and Convective Heat Loss. In: *Bioengineering*. Eds.: K. Cena, J. A. Clark, Elsevier Verlag, Amsterdam - Oxford - New-York.
- Colin, J., Houdas, Y., 1967: Experimental Determination of Coefficient of Heat Exchanges by Convection of Human Body. *J.Appl.Physiol.*, 22, 31-38.
- Collins, K. J., Weiner, J. S., 1962: The Control and Failure of Sweating Man. In: *Biometeorology*, Proc. of the II. Int. Biometeorological Congress, Ed. S. W. Tromp, Pergamon Press, Oxford-London-New York-Paris.
- Crosbie, R. J., Hardy, J. D., Fessenden, E., 1963: Electrical Analog Simulation of Temperature Regulation in Man. In: *Temperature Measurement and Control in Science and Industry*. Ed.:J.D. Hardy, Part III, Rheinhold, New York, 627-635.
- Davis, T. R. A., 1974: Effects of Cold on Animals and Man. In: *Progress in Biometeorology*, Ed. S. W. Tromp, Div.A, Vol.1, Part IA, Swets and Zeitlinger, Amsterdam.
- Davis, T. R. A., 1974: Effects of Heat on Animals and Man. In: *Progress*

- in Biometeorology, Ed. S. W. Tromp, Div. A, Vol. 1, Part IA, Swets and Zeitlinger, Amsterdam.
- De Rudder, B., 1952: Grundriß einer Meteorobiologie des Menschen. Springer Verlag, Berlin.
- Dirmhirn, I., 1964: Das Strahlungsfeld im Lebensraum. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main.
- Donle, W., 1956: Jahreszeit und Witterung im Seuchengeschehen. Enke Verlag, Stuttgart.
- DuBois, D., DuBois, E., 1915: A Formula to Estimate the Approximate Surface Area if Height and Weight be Known. Arch. Intern. Med., 17, 863-871.
- Ehrhardt, J., Muzet, A., Candas, V., Libert, J. P., Vogt, J. J., 1978: Activation Phases During Human Sleep in Different Conditions of Ambient Air Temperature. Proc. of IV. Congr. on Sleep Research, Tingu-Mures, 335-339.
- Faller, A., 1976: Der Körper des Menschen. Adolf Thieme Verlag, Stuttgart.
- Fanger, P. O., 1972: Thermal Comfort. McGraw Hill Book Company, Düsseldorf - New York - London.
- Fanger, P. O., 1978: The Prediction of Comfort and Acceptability of Complex Thermal Environments. In: Energy Conservation Strategies in Buildings. Ed.: J. A. J. Stolwijk, Yale University Printing Service, New Haven, Connecticut.
- Flach, E., 1957: Grundbegriffe und Grundtatsachen der Bioklimatologie. In: Meteorologisches Taschenbuch, Band III, Ed. F. Baur, Akademische Verlagsgesellschaft Geest u. Portig, Leipzig.
- Frank, W., 1975: Raumklima und thermische Behaglichkeit. Berichte aus der Bauforschung, 104, Stuttgart.
- Frisinger, H. H., 1977: The History of Meteorology. Neale Watson Academic Publications, New York.
- Fox, R. H., 1974: Heat Acclimatisation and the Sweating Response. In: Heat Loss from Animals and Man, Ed. J. L. Monteith, Butterworth, London.
- Gagge, A. P., Burton, A. C., Bazett, H. C., 1941: A Practical System of Units for the Description of the Heat Exchange of Man with his Environment. Science, 94, 428-430.
- Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Hardy, J. D., 1965: A Novel Approach of Man's Heat Exchange with a Complex Radiant Environment. J. Aerospace Med., 36, 431-435.
- Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Nishi, Y., 1969: The Prediction of

- Thermal Comfort, when Thermal Equilibrium is Maintained by Sweating. ASHRAE Trans., 75, Part 2.
- Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., 1971: An Effective Temperature Scale Based on a simple Model of Human physiological Regulatory Response. ASHRAE Trans., 77, 247-257.
- Gagge, A. P., 1981: Rational Temperature Indices of Thermal Comfort. In: Bioengineering, Eds. K. Cena, J. A. Clark, Elsevier, Amsterdam - Oxford - New York.
- Gates, D., 1980: Biophysical Ecology. Springer Verlag, New York - Heidelberg - Berlin.
- Geschickter, E. H., Andrews, P. A., Bullard, R. W., 1966: Nocturnal Body Temperature Regulation in Man: a Rational for Sweating in Sleep. J. Appl. Physiol., 21, 623-630.
- Givoni, B., Belding, H.S., 1962: The Cooling Efficiency of Sweat Evaporation. In: Biometeorology, Proc. of the II. Int Biometeorolog. Congress, Ed. S. W. Tromp, Pergamon Press, Oxford - London - New York - Paris.
- Givoni, B., 1964: Biometeorological Indices. In: Progress in Biometeor. Ed. S. W. Tromp, Div A, 1, Part IA, Swets and Zeitlinger, Amsterdam.
- Goldman, R. F., 1981: Evaluating the Effects of Clothing on the Wearer. In: Bioengineering, Eds. K. Cena, J. A. Clark, Elsevier, Amsterdam - Oxford - New York.
- Gonzales, R. R., Nishi, Y., Gagge, A. P., 1974: Experimental Evaluation of Standard Effective Temperature: A New Biometeorological Index of Man's Thermal Discomfort. Int. J. Biometeor., 18, 1-15.
- Gonzales, R. R., 1981: Exercise Physiology and Sensory Response. In: Bioengineering. Eds.: K. Cena, J. A. Clark, Elsevier, Amsterdam - Oxford - New York.
- Gonzales, R. R., Berglund, L. G., Gagge, A. P., 1978: Indices of Thermoregulatory Strain for Moderate Exercise in the Heat. J. Appl. Physiol., 44, 889-889.
- Gordon, R. G., Roemer, R. B., Horvath, S. M., 1977: A Mathematical Model of the Human Temperature Regulatory System. Biomed. Eng., 23, 434-444.
- Grandjean, E., 1973: Wohnungsphysiologie. Verlag für Architektur, Artemis, Zürich.
- Griffiths, J. F., 1972: Climates of Africa. In: World Survey of Climatology, 10, Ed. H. E. Landsberg, Elsevier, Amsterdam - New York -

London.

- Haider, M., 1974: Klimatische Kriterien aus der Sicht des Hygienikers. Intern. CIB-Symposium Klima und humane Umwelt, Zürich.
- Hardy, J. D., Muschenheim, C., 1934: The Radiation of Heat from the Human Body, IV The Emission, Reflection and Transmission of Infrared Radiation by the Human Skin. J. Clin. Invest., 13, 817.
- Hardy, J. D., 1961: Physiology of Temperature Regulation. Physiol.Rev., 41, 521-606.
- Hardy, J. D., Stolwijk, J. A. J., 1966: Partional Calorimetric Studies of Man During Exposures to Thermal Transients. J.Appl.Physiol., 21, 1799-1806.
- Hardy, J. D., 1978: Regulation of Body Temperature in Man - An Overview. In: Energy Conservation Strategies in Buildings. Ed.: J. A. J. Stolwijk, Yale University Printing Service, New Haven, Connecticut.
- Hensel, H., 1955: Mensch und warmblütige Tiere. In: Temperatur und Leben. Ed.: H. Precht, J. Christophersen, H. Hensel, Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg.
- Hentschel, G., 1982: Das Bioklima des Menschen. Verlag Volk und Gesundheit, Berlin.
- Hettinger, Th., Eissing, G., Bolle, D., Urlaub, G., 1980: Persönliche Schutzausrüstungen (I). Forschungsbericht 227 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.
- Hettinger, Th., 1982: Der Arbeitumsatz eines Menschen bei verschiedenartigen Aktivitäten. Persönliche Mitteilungen.
- Höppe, P., 1979: Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen den Umgebungsluftbedingungen und thermo-hygrischen Vorgängen bei der menschlichen Atmung. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München.
- Höppe, P., 1982: Der Wasserverlust des Menschen unter verschiedenen Klimabedingungen. In: Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München, 45, 34-48.
- Höschele, K., 1970: Ein Modell zur Bestimmung des Einflusses der klimatischen Bedingungen auf den Wärmehaushalt und das thermische Befinden des Menschen. Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B., 18, 83-99
- Höschele, K., 1976: Der menschliche Wärmehaushalt bei vermindertem Luftdruck. Internationaler Kongress I.N.R.C.A., Ancona, Italien.
- Hofmann, G., 1955: Die Thermodynamik der Taubildung. Ber. Dtsch. Wetterdienst, 18.
- Hofmann, G., 1968: Prinzipien bei der Aufstellung der Wärmehaushalts-

- gleichungen im Freien exponierter Körper. Angew. Meteor., 5, 293-298.
- Inoue, T., Hick, F. K., Keeton, R. W., 1953: Effect of Relative Humidity on Heat Loss of Men Exposed to Environments of 80, 76, and 72 F, AESHVE Trans., 59, 329-346.
- Ito, M., Miyagawa, T., Ogawa, T., Asayama, M., 1978: Evaluation of Various Methods for Measurements of Sweat Rate. J. Aichi Med. Univ. Ass., 6, 4.
- Jendritzky, G., Sönning, W., Swantes, H.J., 1979: Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung. Beiträge Akad. für Raumforschung und Landesplanung, 28, Hermann Schrödel Verlag, Hannover.
- Jendritzky, G., Nübler, W., 1981: A Model Analysing the Urban Thermal Environment in Physiologically Significant Terms. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 29, 313-326.
- Jendritzky, G., Schmidt-Kessen, W., 1981: Bewegungstherapie im heilklimatischen Kurort. Heilbad und Kurort, 33, 1, 10-19 u. 2, 40-45.
- Jungmann, H., Halhuber, M. J., 1964: The Physiology of Altitude. In: Medical Climatology. Ed. S. Licht, Elizabeth Licht Publisher, New Have Connecticut.
- Kassner, C., 1951: Meteorologische Geschichtstabellen. In: Meteorologisches Taschenbuch, Ed. F. Baur, Akademische Verlagsgesellschaft, Geest und Portig, Leipzig.
- Kerslake, D. Mck., 1955: Factors Concerned in the Regulation of Sweat Production in Man. J. Physiol. Lond., 127, 280-296.
- Kerslake, D. Mck., 1972: The Stress of Hot Environments. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kevan, S. M., 1978: Biometeorologie des Schlafes: Ein neues Forschungsgebiet. Wetter und Leben, 30, 2, 97-107.
- Klauer, H., Schmieder, F., 1963: Messung der Wärmehaltung von Textilien Melland Textilberichte, 1, 33-36.
- Kleiber, J., 1967: Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier. Verlag Paul Parey, Hamburg - Berlin.
- Klein, W. H., 1948: Calculation of Solar Radiation and the Solar Heat Load on Man. J. Meteorology, 5, 119-129.
- Knogler, G., 1803: Meteorologie. Landshut.
- Koch, W., Jennings, B. H., Humphries, C. M., 1960: Environmental Study II - Sensation Responses to Temperature and Humidity under Still Air Conditions in the Comfort Range. ASHRAE Trans., 66, 264-287.
- Krapp, M. C., 1982: Psychophysische Reaktionen auf Luftfeuchteänderun-

- gen in der normothermen Klimakammer. Inaug. Diss. Inst. f. Med. Baln. und Klimatologie der Univ. München.
- Kröhling, P., Dirnagl, K., 1982: Gesundheits- und Befindlichkeitsstörungen in vollklimatisierten Räumen. Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim., 11, 241-244.
- Landsberg, H., 1938: Eine Bett - Temperatur - Studie. Bioklimatolog. Beibl., 5, 66-68.
- Landsberg, H. E., 1963: A Note on Bedroom Climate. Arch. Meteorol. Geophys. Bioklim., Ser. B, 12, 159-203.
- Lauscher, F., 1973: Zur Bestrahlung des Menschen auf Himmelskörpern mit und ohne Atmosphäre. Wetter und Leben, 25, 121-219.
- Lee, D. H. K., Vaughan J. A., 1964: Temperature Equivalent of Solar Radiation on Man. Int. J. Biometeor., 8, 1, 61-69.
- Lefevre, J., 1911: Energetique et Chaleur Animal. Masson, Paris.
- Lehmann, G., 1953: Praktische Arbeitsphysiologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Leß, L., Pfeleiderer, H., 1935: Die klimatischen Ansprüche an die Atemwege des menschlichen Körpers. Biokl. Beibl., 2, 1-4.
- Libert, J. P., Candas, V., Muzet, A., Ehrhardt, J., Vogt, J. J., 1978: Thermoregulation Adjustments During SWS and REM Sleep in Man. Proc. of the IV. Congress on Sleep Research, Tirgu-Mures, 305-307.
- Mayer, E., Künzle, H., 1979: Auswirkung der Heizkörperanordnung auf die thermische Behaglichkeit. Gesundheitsing., 100, 4.
- Mayer, H., 1977: Bioklimatologische Kennziffern für die Waldatmosphäre im Hinblick auf die Erholungsfunktion. Forstwiss. Centralblatt, 3, 212-220.
- Mayer, H., 1982: Oberflächentemperaturen von Wänden und Fenstern in geschlossenen Räumen. Unveröffentlicht.
- Mechels, J., Umbach, K. H., 1976: Thermophysiologische Eigenschaften von Kleidungssystemen. Melliand Textilberichte, 57, 12.
- McArdle, B., Dunham, W., Holling, H. E., Ladell, W. S., Weiner, J. S., 1947: The Prediction of the Physiological Effects of Warm and Hot Environments. Med. Res. Comm., Report No. 47/391, London.
- McCutchan, J., Taylor, C., 1951: Respiratory Heat Exchange with Varying Temperature and Humidity of Inspired Air. J. of appl. Physiol., 4, 121-133.
- McCutchan, J., 1956: Body Evaporation During Short Exposures to Various Temperatures, Humidities, Pressures and Mass Velocities. ASHRAE Trans., 62, 237-248.
- McNall, P. E., Schlegel, J. G., 1968: The Relative Effects of Convec-

- tion and Radiation Heat Transfer on Thermal Comfort for Sedentary and Active Subjects. ASHRAE Trans., 74, part II, 131-143.
- Missenard, A., 1971: Exchange Thermique du Corps Humain avec L' ambience. Rev. Gen. Ther., 117, 765-770.
- Mitchell, D., 1970: Measurement of the Thermal Emissivity of Human Skin in Vivo. In: J. D. Hardy, Physiological and Behavioral Temperature Regulation. Charles C. Thomas, Illinois.
- Mitchell, D., 1974: Convective Heat Transfer from Man and other Animals. In: Heat Loss from Animals and Man, Ed. J. L. Monteith, Butterworth, London.
- Mitchell, D., Wyndham, C. H., Vermeulen, A. J., Hodgson, T., Atkins, A. R., Hofmeyr, H. S., 1969: Radiant and Convective Heat Transfer of Nude Men in Dry Air. J. appl. Physiol., 26, 111-118.
- Monteith, J. L., 1978: Grundzüge der Umweltp Physik. Dr. Steinkopff Verlag, Darmstadt.
- Monteith, J. L., Mount, L. E., 1974: Heat Loss from Animals and Man. Butterworth, London.
- Morgan, D. L., Baskett, R. L., 1974: Comfort of Man in the City - An Energy Balance Model of Man - Environment Coupling. Int. J. Biometeor., 18, 3, 184-198.
- Müller-Limmroth, W., 1977: Untersuchungen über den Einfluß unterschiedlicher Oberbettmaterialien auf das Schlafverhalten und das Bettklima. Schlußbericht des AIF Forschungsvorhabens 3124, Lehrstuhl für Arbeitsphysiologie der TU München.
- Munn, R. E., 1970: Biometeorological Methods. Academic Press, New York-London.
- Nelson, N., Eichna, L. W., Horvath, S. W., Shelley, W. B., Hatch, T.F., 1947: Thermal Exchange of Man at high Temperature. Am. J. Physiol., 151, 626-652.
- Nishi, Y., 1981: Measurement of Thermal Balance of Man. In: Bioengineering. Eds.: K. Cena, J. A. Clark, Elsevier, Amsterdam - Oxford-New York.
- Nishi, Y., Gagge, A. P., 1970: Direct Evaluation of Convective Heat Transfer Coefficient by Naphtalene Sublimation. J. Appl. Physiol., 29, 830-838.
- Nishi, Y., 1978: The Role of Air Velocity in Promoting Comfort and Acceptability of Thermal Environments. In: Energy Conservation Strategies in Buildings, Ed. J. A. J. Stolwijk, Yale University Printing Service, New Haven, Connecticut.
- Nishi, Y., Ibamoto, K., 1969: Model Skin Temperature an Index of Ther-

- mal Sensation in Cold, Warm, Humid Environments. ASHRAE Trans., 75, 2, 94-107.
- Ogawa, T., Ito, M., Miyagawa, T., Asayama, M., 1979: Regional Differences in Occurrence of Thermal Sweating. Jap. J. Biometeor., 16,1, 22-29.
- Ogawa, T., Asayama, M., Ito, M., Miyagawa, T., 1980: Dermatoma Inhibition of Sweating by Skin Pressure. Satellite of 28. Int. Congr. of Physiol. Sci., Pecs.
- Orvig, S., 1970: Climate of the Polar Regions. In: World Survey of Climatology, 14, Ed. H. E. Landsberg, Elsevier, Amsterdam-New York-London.
- Paeschke, R., 1973: Das Verhalten von Körpertemperatur und Temperaturempfinden des Menschen während eines langfristigen Klimakammeraufenthaltes bei wechselnder Luftfeuchte. Inaug. Diss. Inst. f. Med. Balneologie und Klimatologie der Univ. München.
- Petersen, W. F., 1938: The Patient and Weather. Edwards, Ann Arbor, Michigan.
- Pirlet, K., 1960: Thermische Einflüsse auf die Atemwege. 1. Mitt. Fund. Balneo- Bioclimatologica, 1, 369-464.
- Precht, H., Christophersen, J., Hensel, H., 1955: Temperatur und Leben. Springer Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg.
- Rapp, G. M., 1973: Convective Heat Transfer and Convective Coefficients of Nude Man, Cylinders and Spheres at Low Air Velocities. ASHRAE Trans., 79, 75-87.
- Rees, W. H., Ogden, L. W., 1946: Some Observations upon the Effect of Colour on the Absorption and Emission of Radiation by a Textile Fabric. J. Text. Inst., 37, 113-120.
- Reifferscheid, H., 1957: Meßwerte und theoretische Überlegungen zum Wärmedurchgang durch Gewebe aus natürlichen und synthetischen Fasern. Melland, 38, 2, 189-191.
- Rohles, F. H., Nevins, R. G., 1971: The Nature of Thermal Comfort for Sedentary Man. ASHRAE Trans., 77, 239-246.
- Roller, W. L., Goldman, R. F., 1967: Estimation of Solar Radiation Environment. Int. J. Biometeor., 11, 3, 329-336.
- Rudloff, W., 1981: World Climates. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m.b.H., Stuttgart.
- Saltin, B., Gagge, A. P., 1971: Sweating and Body Temperatures During Exercise. Int. J. Biometeor., 15, 189-194.
- Sargent, F., 1962: Depression of Sweating in Man: so Called Sweat Gland Fatigue. In: Advances in Biology of Skin, 3, 163-212. Eds.: W.

- Montagna, R. A. Ellis, I. A. Silver, Pergamon, London.
- Schlünder, E. U., 1972: Einführung in die Wärme- und Stoffübertragung. Vieweg Verlag - Uni Text, Braunschweig.
- Schüle, W., 1956: Fragen der Behaglichkeit des Raumklimas bei der Beheizung von Räumen. Z. Kachelofen und Keramik, 7.
- Seeley, L., 1940: Study of Changes in the Temperature and Water Vapor of the Respired Air in the Nasal Cavity. ASHVE Trans., 1159.
- Sibbons, J. L. H., 1966: Assessment of Thermal Stress from Energy Balance Considerations. J. Appl. Physiol., 21, 1207-1217.
- Snellen, J. W., 1966: Mean Body Temperature and the Control of Thermal Sweating. Acta physiol. pharmacol., neerl., 14, 99-174.
- Tromp, Pergamon Press, Oxford - New York - London - Paris.
- Spitzer, H., Hettinger, T., Kaminsky, G., 1982: Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit. Beuth Verlag GmbH, Berlin-Köln.
- Sprague, C. H., Munson, D. M., 1974: A Composite Ensemble Method for Estimating Thermal Insulation Values of Clothing. ASHRAE Trans., 80, 1, 120-129.
- Steadman, R. G., 1979: The Assessment of Sultriness, Part I : A Temperature Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science. J. of Appl. Met., 18, 7, 861-873.
- Stolwijk, J. A. J., 1970: Mathematical Model of Thermoregulation. In: Physiological and Behavioural Temperature Regulation. Ed.: J. D. Hardy, A. P. Gagge, J. A. J. Stolwijk, C. C. Thomas, Springfield, 703-721.
- Stolwijk, J. A. J., Hardy, J. D., 1966: Partial Calorimetric Studies of Response of Man to Thermal Transients. J. Appl. Physiol., 21, 967-977.
- Straaten van, J. F., 1967: Thermal Performance of Buildings. Elsevier Publ. Comp., Amsterdam.
- Sugenoya, J., Ogawa, T., Asayama, M., Miyagawa, T., 1982: Occurrence of Mental and Thermal Sweating on the Human Axilla. Jap. J. of Physiol., 32, 717-726.
- Terjung, W. H., O'Rourke, P. A., 1981: Energy Input and Resultant Surface Temperature for Individual Urban Interfaces, Selected Latitudes and Seasons. Arch. Meteor. Geophys. Bioklim., 29, 1-22.
- Thauer, R., 1955: Physiologie der Wärmeregulation. Acta. Neuroveget., 10, 12.
- Theves, B., Hundhausen, E., 1982: Die momentane thermische Bilanzstörung - Ein Objektivierungsversuch des thermischen Empfindens. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 30, 171-185.
- Tromp, S. W., 1974: Principal Centres in the Human Body Registering Me-

- teorological Stimuli. In Progress in Biometeorology, Div. A., 1, Part IA, Swets and Zeitlinger, Amsterdam.
- Tromp, S. W., 1980: Biometeorology. Heyden and Son Ltd., London-Philadelphia-Rheine.
- Turner, D., 1955: Energy Cost of some Industrial Operations. Brit. J. Industr. Med., 12, 273.
- Umbach, K. H., 1980: Messung der bekleidungsphysiologischen Eigenschaften von Textilien. Melliand Textilber., 61, 543-548.
- Umbach, K. H., 1982: Einfluß der äußeren Luftbewegung auf den Verwendungsbereich von Kleidung. Hohensteiner Forschungsbericht. Bekleidungsphysiologisches Institut Hohenstein e.V.
- Vaitl, W., 1980: Die menschliche Wärmebilanz in verschiedenen Innenräumen. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Bioklimatologie u. Angewandte Meteorologie der Universität München.
- Vogt, J. J., Candas, V., 1981: Required Sweat Rate as an Index of Thermal Strain in Industry. In: Bioengineering, Eds.: Cena, K., Clark, J. B., Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York.
- Walker, J., Wells, R., 1961: Heat and Water Exchange in the Respiratory Tract. Am. J. of Med., 30, 259-267.
- Webb, P., 1951: Air Temperature in the Respiratory Tracts of Resting Subjects in Cold. J. of Appl. Physiol., 4, 378-382.
- Wenzel, H. G., Piekarski, C., 1980: Klima und Arbeit. Veröffentlichung des Bayerischen Staatsministeriums für Arbeit und Sozialordnung, München.
- Winslow, C. E. A., Herrington, L. P., Gagge, A. P., 1936: The Determination of Radiation and Convection Exchanges by Partial Calorimetry. Amer. J. Physiol., 116 (3), 669-684.
- Winslow, C. E. A., Herrington, L. P., 1949: Temperature and Human Life. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Wissler, E. H., 1963: An Analysis of Factors Affecting Temperature levels in the Nude Human. In.: Temperature its Measurement and Control in Science and Industry. Ed.: J. D. Hardy, Reinhold, New York, Part III, 603-612.
- Wyndham, C. H., Morrison, J. F., Williams, C. G., 1965: Heat Reactions of Male and Female Caucasians. J. Appl. Physiol., 20, 357-364.
- Yamaguchi, K., Kobayashi, Y., Isoda, N., 1979: Experimental Study on Radiant Heat Exchange Between Human Body and its Outdoor Surrounding including Buildings. Int. J. Biometeor., 23, 2, 172.
- American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1966: Thermal Comfort Conditions. New York.
- Documenta Geigy, 1968: Wissenschaftliche Tabellen. 7. Aufl., Basel.

- Burt, J. E., O'Rourke, P. A., Terjung, W. H., 1982: The Relative Influence of Urban Climates on Outdoor Human Energy Budgets and Skin Temperatures, II. Man in an Urban Environment. *Int. J. Biometeor* 26, 1, 25-35.
- Chandler, T. S., 1976: Urban Climatology and its Relevance to Urban Design. WMO Techn. Note No. 149.
- Clarke, J. F., Bach, W., 1971: Comparison of the Comfort Conditions in Different Urban and Suburban Microenvironments. *Int.J. Biometeor* 15, 1, 41-54.
- Gehrke, A. Nübler, W. Weischet, W., 1977: Oberflächen- und Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Baukörperstruktur. *Ann. d. Met.*, 12, 193-196.
- Gietl, G., Mayer, H., 1976: Der Einfluß eines Fichtenbestandes auf Behaglichkeitsparameter. *Forstwiss. Centralblatt*, 2, 125-142.
- Givoni, B., 1964: A New Method for Evaluating Industrial Heat Exposure and Maximum Permissible Work Load. *Int. J. Biometeor.*, 8, 115-124.
- Givoni, B., 1964: Prediction of Human Subjective Response to Thermal Stress. In: *Prog. in Biomet.*, Ed. S.W. Tromp, Div A, 1, Part IA, Swets and Zeitlinger, Amsterdam.
- Givoni, B., 1964: Architectural and Urban Planning in Relation to Weather and Climate. In: *Prog. in Biomet.*, Ed. S. W. Tromp, Div A, 1, Part 1A, Swets and Zeitlinger, Amsterdam.
- Hensel, H., 1952: Bestimmung von Wärmeleitzahlen lebender Gewebe. *Erg. Physiol*, 47, 166.
- Höschele, K., 1977: Konkurrierende Gesichtspunkte der Zielstellungen für das Stadt- und Landschaftsklima. *Ann. d. Meteor.*, 12, 197-200.
- Muzet, A., Ehrhardt, J., Libert, J. P., Candas, V., 1979: The Effect of Thermal Environment on Sleep Stages. In: *Indoor Climate*, Ed. P.O. Fanger, O. Valbjorn, Danish Building Research Institute, Copenhagen.
- Nishi, Y., Gagge, A. P., 1970: Moisture Permeation of Clothing - A Factor Governing Thermal Equilibrium and Comfort. *ASHRAE Trans.*, 76, 137-145.
- Rees, H., 1941: Transmission of Heat through Textile Fabrics. *J. of the Text. Inst.*, 32, 149-166.
- Robinson, N., Peley, M., 1962: Direct Solar Radiation on and inside Buildings in Biometeorology. *Proc. of the II. Int. Cong. of Biometeor.*, Ed. S. W. Tromp, Pergamon Press, Oxford-London-New York

Paris.

- Schüle, W., 1956: Die Wärmetechnischen Aufgaben von Decke und Fußboden. Z. Boden, Wand, Decke, 6.
- Sohar, E., Tennenbaum, J., Robinson, N., 1962: A Comparison of the Cumulative Discomfort Index and Cumulative Effective Temperature as Obtained by Meteorological Data. In: Biometeorology, Ed. S.W. Swantes, H. J., 1981: Das Waldklima und seine bioklimatologische Wirkung auf den Menschen. Heilbad u. Kurort, 33, 241-244.
- Terjung, W. H., 1970: The Energy Budget of Man at High Altitudes. Int. J. Biometeor., 14, 1, 13-43.
- Tromp, S. W., 1974: Urban Climatology (With Reference to the Interrelationship Between External Weather and the Microclimate in Houses and Buildings). In: Progress in Biometeorology, Div.A., 1, Part 1A, Swets and Zeitlinger, Amsterdam.
- Tuller, S. E., 1975: The Energy Budget of Man: Variations with Aspect in a Downtown Urban Environment. Int. J. Biometeor., 19, 1, 2-13.
- Tuller, S.W., 1980: Effects of a Moderate Sized City on the Human Thermal Bioclimate During Clear Winter Nights. Int. J. Biometeor., 24, 2, 97-106.

ANHANG

Liste der Terme in den Tabellen 1-22 im Anhang

T_a	: Lufttemperatur in $^{\circ}\text{C}$
T_{mrt}	: mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung in $^{\circ}\text{C}$
v	: Windgeschwindigkeit in m/s
e_1	: Dampfdruck der Umgebungsluft in mb
G	: Geschlecht (1 = männlich, 2 = Weiblich)
AL	: Alter in Jahren
GR	: Körpergröße in m
GE	: Körpermasse in kg
KP	: Körperposition (1 = stehend, 2 = sitzend, 3 = gehend)
I_{cl}	: Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung in clo
T_{sk}	: mittlere Hauttemperatur in $^{\circ}\text{C}$
T_c	: Kerntemperatur in $^{\circ}\text{C}$
T_{cl}	: mittlere Oberflächentemperatur der Kleidung in $^{\circ}\text{C}$
WS	: Wasserverlust durch Transpiration in g/h
H	: Innere Wärme in W
E_{Sw}	: latenter Wärmefluß durch Schweißverdunstung in W
E_{Re}	: Atemwärmefluß in W
E_D	: latenter Wärmefluß durch Wasserdampfdiffusion in W
Q	: Nettostrahlung des Körpers in W
L	: Fluß fühlbarer Wärme in W
N	: Nahrungswärmefluß in W
KO	: Komfortbewertung (-1 = zu kalt, 0 = neutral, 1 = zu warm)
B	: Hautbenetzungsgrad in %
P	: Personenkennzahl (1 = junge Frau, 2 = junger Mann, 3 = ältere Frau, 4 = älterer Mann)
z	: Verhältnis der bekleideten zur unbekleideten Hautoberfläche

Tab. 1: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur im Bereich $-5^{\circ}\text{C} \leq t_{\text{q}} \leq 30^{\circ}\text{C}$ eines ruhig stehenden Mannes.

T_a	T_{mrt}	V	e_i	G	AL	GR	GE	KP	I	T_{sk}	T_C	T_{cl}	WS	H	E_{Sw}	E_{Re}	E_D	Q	L	N	KO	B
-5.0	-5.0	0.5	2.1	1	35	1.80	80	1	1.0	6.4	36.9	-0.5	0	132	0	-10	-5	-37	-80	0	-1	0
0.0	0.0	0.5	3.1	1	35	1.80	80	1	1.0	11.2	36.9	4.4	0	132	0	-10	-6	-38	-77	0	-1	0
5.0	5.0	0.5	4.4	1	35	1.80	80	1	1.0	15.8	36.9	9.2	0	132	0	-10	-8	-39	-75	0	-1	0
10.0	10.0	0.5	6.1	1	35	1.80	80	1	1.0	20.5	36.9	14.0	0	132	0	-11	-11	-39	-71	0	-1	0
15.0	15.0	0.5	8.5	1	35	1.80	80	1	1.0	25.0	36.9	18.8	0	132	0	-11	-14	-39	-68	0	-1	0
20.0	20.0	0.5	11.7	1	35	1.80	80	1	1.0	29.6	36.8	23.6	0	132	0	-11	-18	-39	-64	0	0	0
25.0	25.0	0.5	15.8	1	35	1.80	80	1	1.0	34.0	36.8	28.3	0	132	0	-11	-23	-38	-60	0	0	0
30.0	30.0	0.5	21.2	1	35	1.80	80	1	1.0	35.0	36.9	31.8	71	132	-48	-11	-19	-22	-33	0	1	13

Tab. 2: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH bei einer Lufttemperatur $t_{\text{q}}=10^{\circ}\text{C}$ eines ruhig stehenden Mannes.

T_a	T_{mrt}	V	RH	G	AL	GR	GE	KP	I	T_{sk}	T_C	T_{cl}	WS	H	E_{Sw}	E_{Re}	E_D	Q	L	N	KO	B
10.0	10.0	0.5	0	1	35	1.80	80	1	1.0	20.0	36.9	13.8	0	132	0	-12	-14	-37	-68	0	-1	0
10.0	10.0	0.5	20	1	35	1.80	80	1	1.0	20.2	36.9	13.9	0	132	0	-12	-13	-38	-69	0	-1	0
10.0	10.0	0.5	40	1	35	1.80	80	1	1.0	20.4	36.9	14.0	0	132	0	-11	-12	-39	-71	0	-1	0
10.0	10.0	0.5	60	1	35	1.80	80	1	1.0	20.6	36.9	14.0	0	132	0	-10	-10	-39	-72	0	-1	0
10.0	10.0	0.5	80	1	35	1.80	80	1	1.0	20.7	36.9	14.1	0	132	0	-10	-9	-40	-73	0	-1	0
10.0	10.0	0.5	100	1	35	1.80	80	1	1.0	20.9	36.9	14.2	0	132	0	-9	-8	-41	-75	0	-1	0

Tab. 3: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH bei einer Lufttemperatur $t_{\text{q}}=30^{\circ}\text{C}$ eines ruhig stehenden Mannes.

T_a	T_{mrt}	V	RH	G	AL	GR	GE	KP	I	T_{sk}	T_C	T_{cl}	WS	H	E_{Sw}	E_{Re}	E_D	Q	L	N	KO	B
30.0	30.0	0.5	0	1	35	1.80	80	1	1.0	34.9	36.9	31.8	43	132	-29	-17	-33	-21	-32	0	1	5
30.0	30.0	0.5	20	1	35	1.80	80	1	1.0	34.9	36.9	31.8	55	132	-37	-15	-27	-21	-32	0	1	7
30.0	30.0	0.5	40	1	35	1.80	80	1	1.0	35.0	36.9	31.8	66	132	-44	-12	-22	-22	-33	0	1	11
30.0	30.0	0.5	60	1	35	1.80	80	1	1.0	35.0	36.9	31.8	77	132	-52	-10	-16	-22	-33	0	1	16
30.0	30.0	0.5	80	1	35	1.80	80	1	1.0	35.1	36.9	31.9	88	132	-59	-7	-10	-22	-33	0	1	25
30.0	30.0	0.5	100	1	35	1.80	80	1	1.0	35.1	36.9	31.9	99	132	-66	-5	-5	-22	-34	0	1	45

Tab. 4: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur im Bereich $-5^{\circ}\text{C} \leq t_{\text{Luft}} \leq 30^{\circ}\text{C}$ eines hart arbeitenden Mannes.

T _a	T _{mrt}	V	e _I	G	AL	GR	GE	KP	I _{cl}	T _{sk}	T _C	T _{cl}	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B
-5.0	-5.0	0.5	2.1	1	35	1.80	80	1	1.0	29.0	37.6	8.3	108	482	-72	-37	-19	-117	-236	0	0	18
0.0	0.0	0.5	3.1	1	35	1.80	80	1	1.0	30.3	37.6	11.8	163	482	-109	-37	-18	-108	-209	0	1	26
5.0	5.0	0.5	4.4	1	35	1.80	80	1	1.0	31.7	37.5	15.3	215	482	-144	-38	-18	-99	-183	0	1	33
10.0	10.0	0.5	6.1	1	35	1.80	80	1	1.0	34.0	37.3	19.2	251	482	-169	-39	-19	-92	-163	0	1	35
15.0	15.0	0.5	8.5	1	35	1.80	80	1	1.0	34.4	37.4	22.3	326	482	-219	-40	-15	-77	-131	0	1	46
20.0	20.0	0.5	11.7	1	35	1.80	80	1	1.0	34.8	37.5	25.5	403	482	-271	-40	-11	-61	-99	0	1	59
25.0	25.0	0.5	15.8	1	35	1.80	80	1	1.0	35.2	37.6	28.8	484	482	-325	-41	-6	-43	-68	0	1	76
30.0	30.0	0.5	21.2	1	35	1.80	80	1	1.0	35.5	37.8	32.0	570	482	-381	-40	0	-24	-36	0	1	100

Tab. 5: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH bei einer Lufttemperatur $t_{\text{Luft}} = 30^{\circ}\text{C}$ eines hart arbeitenden Mannes.

T _a	T _{mrt}	V	RH	G	AL	GR	GE	KP	I _{cl}	T _{sk}	T _C	T _{cl}	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B
30.0	30.0	0.5	0	1	35	1.80	80	1	1.0	35.4	37.7	32.0	514	482	-346	-62	-15	-23	-36	0	1	58
30.0	30.0	0.5	20	1	35	1.80	80	1	1.0	35.5	37.7	32.0	536	482	-360	-53	-9	-24	-36	0	1	71
30.0	30.0	0.5	40	1	35	1.80	80	1	1.0	35.5	37.8	32.0	557	482	-375	-45	-3	-24	-36	0	1	88
30.0	30.0	0.5	60	1	35	1.80	80	1	1.0	36.6	38.9	32.4	901	482	-374	-36	0	-29	-44	0	1	100
30.0	30.0	0.5	80	1	35	1.80	80	1	1.0	38.7	41.0	33.2	1763	482	-360	-27	0	-38	-57	0	1	100
30.0	30.0	0.5	100	1	35	1.80	80	1	1.0	40.5	42.9	33.8	2000	482	-348	-18	0	-46	-69	0	1	100

Tab. 6: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur im Bereich $-5^{\circ}\text{C} \leq t_{\text{Luft}} \leq 30^{\circ}\text{C}$ einer hart arbeitenden Frau.

T _a	T _{mrt}	V	e _I	G	AL	GR	GE	KP	I _{cl}	T _{sk}	T _C	T _{cl}	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B
-5.0	-5.0	0.5	2.1	2	35	1.60	60	1	1.0	31.0	37.7	9.1	156	459	-105	-35	-15	-101	-203	0	1	29
0.0	0.0	0.5	3.1	2	35	1.60	60	1	1.0	33.4	37.5	13.0	181	459	-122	-36	-17	-98	-187	0	1	30
5.0	5.0	0.5	4.4	2	35	1.60	60	1	1.0	34.5	37.6	16.3	229	459	-154	-36	-16	-89	-164	0	1	36
10.0	10.0	0.5	6.1	2	35	1.60	60	1	1.0	35.0	37.7	19.5	287	459	-193	-37	-14	-78	-138	0	1	46
15.0	15.0	0.5	8.5	2	35	1.60	60	1	1.0	35.4	38.1	22.7	347	459	-233	-38	-11	-66	-112	0	1	56
20.0	20.0	0.5	11.7	2	35	1.60	60	1	1.0	35.8	38.5	25.9	409	459	-275	-38	-7	-53	-86	0	1	69
25.0	25.0	0.5	15.8	2	35	1.60	60	1	1.0	36.2	38.9	29.1	473	459	-318	-39	-3	-38	-60	0	1	85
30.0	30.0	0.5	21.2	2	35	1.60	60	1	1.0	37.2	39.9	32.6	675	459	-356	-38	0	-26	-39	0	1	100

Tab. 7: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH bei einer Lufttemperatur $T_1=30^{\circ}\text{C}$ einer hart arbeitenden Frau.

T_a	T_{mrt}	V	RH	G	AL	GR	GE	KP	I	cl	T	sk	T_C	T	ci	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B
30.0	30.0	0.5	0	2	35	1.60	60	1	1.0	36.4	38.9	36.4	32.3	495	32.3	495	459	-332	-59	-11	-23	-34	0	1	65
30.0	30.0	0.5	20	2	35	1.60	60	1	1.0	36.5	39.1	36.5	32.4	513	32.4	513	459	-345	-51	-6	-23	-35	0	1	78
30.0	30.0	0.5	40	2	35	1.60	60	1	1.0	36.5	39.2	36.5	32.4	532	32.4	532	459	-358	-43	-1	-23	-35	0	1	96
30.0	30.0	0.5	60	2	35	1.60	60	1	1.0	38.3	41.0	38.3	33.0	928	33.0	928	459	-351	-34	0	-29	-44	0	1	100
30.0	30.0	0.5	80	2	35	1.60	60	1	1.0	40.2	43.0	40.2	33.7	1484	33.7	1484	459	-342	-26	0	-36	-54	0	1	100
30.0	30.0	0.5	100	2	35	1.60	60	1	1.0	42.0	44.8	42.0	34.4	2000	34.4	2000	459	-334	-18	0	-43	-64	0	1	100

Tab. 8: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers eines Mannes und einer Frau bei gleicher spezifischer Rate ($M=150\text{ W/m}^2$) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit.

T_a	T_{mrt}	V	RH	G	AL	GR	GE	KP	I	T_{sk}	T_C	T_{cl}	WS	H	E_{Sw}	E_{Re}	E_D	Q	L	N	KO	B
20.0	20.0	0.5	0	1	35	1.80	80	1	1.0	34.2	37.1	25.3	128	300	-86	-33	-28	-58	-95	0	0	15
20.0	20.0	0.5	20	1	35	1.80	80	1	1.0	34.3	37.1	25.3	137	300	-92	-30	-25	-58	-95	0	0	18
20.0	20.0	0.5	40	1	35	1.80	80	1	1.0	34.3	37.1	25.3	145	300	-98	-27	-22	-58	-96	0	0	21
20.0	20.0	0.5	60	1	35	1.80	80	1	1.0	34.3	37.1	25.4	154	300	-103	-24	-19	-59	-96	0	0	25
20.0	20.0	0.5	80	1	35	1.80	80	1	1.0	34.4	37.1	25.4	162	300	-109	-21	-15	-59	-96	0	1	30
20.0	20.0	0.5	100	1	35	1.80	80	1	1.0	34.4	37.2	25.4	170	300	-115	-18	-12	-59	-96	0	1	36
20.0	20.0	0.5	0	2	35	1.60	60	1	1.0	34.5	37.2	25.4	101	245	-68	-27	-23	-48	-79	0	0	15
20.0	20.0	0.5	20	2	35	1.60	60	1	1.0	34.6	37.2	25.5	108	245	-72	-24	-21	-48	-79	0	0	17
20.0	20.0	0.5	40	2	35	1.60	60	1	1.0	34.6	37.2	25.5	114	245	-77	-22	-18	-49	-79	0	0	20
20.0	20.0	0.5	60	2	35	1.60	60	1	1.0	34.7	37.2	25.5	121	245	-81	-19	-16	-49	-80	0	0	23
20.0	20.0	0.5	80	2	35	1.60	60	1	1.0	34.7	37.2	25.5	128	245	-86	-17	-13	-49	-80	0	1	28
20.0	20.0	0.5	100	2	35	1.60	60	1	1.0	34.8	37.2	25.5	135	245	-91	-14	-11	-49	-80	0	1	33

Tab. 9: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T_a
am Beispiel von 4 verschiedenen Personen.

T_a	T_{mrt}	V	e_i	C	AL	GR	GE	KP	I_{cl}	T_{sk}	T_c	T_{cl}	WS	H	E_{sw}	E_{re}	E_D	Q	L	N	KO	B	P
16.0	16.0	0.1	9.1	2	20	1.65	60	2	0.8	25.2	36.8	20.8	0	97	0	-8	-12	-38	-39	0	-1	0	1
16.0	16.0	0.1	9.1	1	20	1.80	75	2	1.0	26.5	36.8	20.8	0	116	0	-10	-15	-45	-46	0	-1	0	2
16.0	16.0	0.1	9.1	2	60	1.65	60	2	0.8	24.2	36.8	20.2	0	86	0	-7	-11	-34	-34	0	-1	0	3
16.0	16.0	0.1	9.1	1	60	1.80	75	2	1.0	25.2	36.8	20.2	0	102	0	-8	-14	-39	-40	0	-1	0	4
16.0	16.0	0.1	9.1	2	20	1.65	60	2	0.8	33.2	37.0	24.8	1	182	0	-15	-21	-73	-72	0	0	0	1
16.0	16.0	0.1	9.1	1	20	1.80	75	2	1.0	33.7	36.9	24.1	6	201	-4	-17	-26	-77	-77	0	0	1	2
16.0	16.0	0.1	9.1	2	60	1.65	60	2	0.8	32.3	37.0	24.4	0	171	0	-14	-20	-69	-68	0	0	0	3
16.0	16.0	0.1	9.1	1	60	1.80	75	2	1.0	32.8	36.9	23.7	0	187	0	-15	-24	-73	-74	0	0	0	4
18.0	18.0	0.1	10.3	2	20	1.65	60	2	0.8	27.0	36.8	22.6	0	97	0	-8	-13	-38	-38	0	-1	0	1
18.0	18.0	0.1	10.3	1	20	1.80	75	2	1.0	28.2	36.8	22.7	0	116	0	-10	-17	-45	-45	0	-1	0	2
18.0	18.0	0.1	10.3	2	60	1.65	60	2	0.8	26.0	36.8	22.1	0	86	0	-7	-12	-33	-33	0	-1	0	3
18.0	18.0	0.1	10.3	1	60	1.80	75	2	1.0	27.0	36.8	22.1	0	102	0	-8	-15	-39	-39	0	-1	0	4
18.0	18.0	0.1	10.3	2	20	1.65	60	2	0.8	34.0	36.9	26.2	16	182	-11	-15	-21	-68	-67	0	0	4	1
18.0	18.0	0.1	10.3	1	20	1.80	75	2	1.0	34.1	36.9	25.3	28	201	-19	-17	-24	-71	-70	0	0	6	2
18.0	18.0	0.1	10.3	2	60	1.65	60	2	0.8	33.7	36.9	26.0	3	171	-2	-14	-21	-67	-65	0	0	1	3
18.0	18.0	0.1	10.3	1	60	1.80	75	2	1.0	34.0	36.9	25.3	8	187	-5	-16	-25	-71	-70	0	0	2	4
20.0	20.0	0.1	11.7	2	20	1.65	60	2	0.8	28.8	36.8	24.5	0	97	0	-8	-14	-38	-37	0	-1	0	1
20.0	20.0	0.1	11.7	1	20	1.80	75	2	1.0	30.0	36.8	24.6	0	116	0	-10	-18	-44	-43	0	0	0	2
20.0	20.0	0.1	11.7	2	60	1.65	60	2	0.8	27.8	36.8	24.0	0	86	0	-7	-13	-33	-32	0	-1	0	3
20.0	20.0	0.1	11.7	1	60	1.80	75	2	1.0	28.7	36.8	24.0	0	102	0	-8	-17	-39	-38	0	-1	0	4
20.0	20.0	0.1	11.7	2	20	1.65	60	2	0.8	34.3	37.0	27.3	38	182	-26	-15	-20	-62	-59	0	0	9	1
20.0	20.0	0.1	11.7	1	20	1.80	75	2	1.0	34.3	37.0	26.5	53	201	-36	-17	-22	-64	-62	0	0	12	2
20.0	20.0	0.1	11.7	2	60	1.65	60	2	0.8	34.2	36.9	27.2	23	171	-16	-14	-20	-61	-59	0	0	6	3
20.0	20.0	0.1	11.7	1	60	1.80	75	2	1.0	34.2	36.9	26.5	33	187	-22	-16	-23	-64	-62	0	0	7	4
22.0	22.0	0.1	13.2	2	20	1.65	60	2	0.8	30.6	36.8	26.4	0	97	0	-8	-16	-37	-36	0	0	0	1
22.0	22.0	0.1	13.2	1	20	1.80	75	2	1.0	31.7	36.8	26.4	0	116	0	-10	-20	-42	-42	0	0	0	2
22.0	22.0	0.1	13.2	2	60	1.65	60	2	0.8	29.6	36.8	25.8	0	86	0	-7	-14	-33	-31	0	0	0	3
22.0	22.0	0.1	13.2	1	60	1.80	75	2	1.0	30.5	36.8	25.9	0	102	0	-9	-18	-38	-37	0	0	0	4
22.0	22.0	0.1	13.2	2	20	1.65	60	2	0.8	34.6	37.0	28.4	61	182	-41	-15	-18	-55	-52	0	0	15	1
22.0	22.0	0.1	13.2	1	20	1.80	75	2	1.0	34.5	37.0	27.6	79	201	-53	-17	-20	-56	-54	0	0	18	2
22.0	22.0	0.1	13.2	2	60	1.65	60	2	0.8	34.5	37.0	28.3	46	171	-31	-14	-19	-55	-52	0	0	11	3
22.0	22.0	0.1	13.2	1	60	1.80	75	2	1.0	34.4	37.0	27.6	59	187	-40	-16	-22	-56	-54	0	0	13	4

Fortsetzung von Tabelle 9:

T _a	T _{mrt}	V	e _i	G	AL	GR	GE	KP	I _{ci}	T _{sk}	T _C	T _{ci}	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B	P
24.0	24.0	0.1	14.9	2	20	1.65	60	2	0.8	32.3	36.8	28.2	0	97	0	-8	-17	-37	-35	0	0	0	1
24.0	24.0	0.1	14.9	1	20	1.80	75	2	1.0	33.5	36.8	28.3	0	116	0	-10	-22	-43	-41	0	0	0	2
24.0	24.0	0.1	14.9	2	60	1.65	60	2	0.8	31.3	36.8	27.7	0	86	0	-7	-16	-32	-30	0	0	0	3
24.0	24.0	0.1	14.9	1	60	1.80	75	2	1.0	32.3	36.8	27.7	0	102	0	-9	-20	-38	-36	0	0	0	4
24.0	24.0	0.1	14.9	2	20	1.65	60	2	0.8	34.8	37.1	29.5	86	182	-57	-15	-16	-48	-45	0	1	21	1
24.0	24.0	0.1	14.9	1	20	1.80	75	2	1.0	34.7	37.0	28.8	106	201	-71	-17	-18	-49	-46	0	1	24	2
24.0	24.0	0.1	14.9	2	60	1.65	60	2	0.8	34.7	37.0	29.4	70	171	-47	-14	-17	-48	-44	0	1	17	3
24.0	24.0	0.1	14.9	1	60	1.80	75	2	1.0	34.6	37.0	28.8	85	187	-57	-16	-19	-49	-46	0	1	20	4
26.0	26.0	0.1	16.8	2	20	1.65	60	2	0.8	34.1	36.8	30.1	0	97	0	-8	-19	-36	-33	0	0	0	1
26.0	26.0	0.1	16.8	1	20	1.80	75	2	1.0	34.7	36.8	29.9	9	116	-6	-10	-23	-40	-37	0	1	2	2
26.0	26.0	0.1	16.8	2	60	1.65	60	2	0.8	33.1	36.7	29.6	0	86	0	-7	-17	-32	-29	0	0	0	3
26.0	26.0	0.1	16.8	1	60	1.80	75	2	1.0	34.0	36.7	29.6	0	102	0	-9	-22	-37	-34	0	0	0	4
26.0	26.0	0.1	16.8	2	20	1.65	60	2	0.8	35.0	37.1	30.6	110	182	-74	-15	-15	-41	-37	0	1	28	1
26.0	26.0	0.1	16.8	1	20	1.80	75	2	1.0	34.8	37.0	30.0	133	201	-89	-17	-16	-41	-38	0	1	32	2
26.0	26.0	0.1	16.8	2	60	1.65	60	2	0.8	35.0	37.1	30.5	95	171	-64	-14	-15	-40	-37	0	1	24	3
26.0	26.0	0.1	16.8	1	60	1.80	75	2	1.0	34.8	37.0	29.9	113	187	-76	-16	-17	-41	-38	0	1	27	4

Tab. 10: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit vom Dampfdruck e_a am Beispiel von 4 verschiedenen Personen.

T	T _a	T _{mrt}	V	e _i	G	AL	GR	GE	KP	I	T _{sk}	T _C	T _{ci}	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B _P	
20.0	20.0	20.0	0.1	4.0	2	20	1.65	60	2	0.8	28.2	36.8	24.2	0	97	0	-10	-18	-35	-34	0	-1	0	1
20.0	20.0	20.0	0.1	4.0	1	20	1.80	75	2	1.0	29.4	36.8	24.3	0	116	0	-12	-22	-41	-41	0	0	0	2
20.0	20.0	20.0	0.1	4.0	2	60	1.65	60	2	0.8	27.2	36.8	23.7	0	86	0	-9	-16	-31	-30	0	-1	0	3
20.0	20.0	20.0	0.1	4.0	1	60	1.80	75	2	1.0	28.1	36.8	23.7	0	102	0	-10	-20	-36	-35	0	-1	0	4
20.0	20.0	20.0	0.1	4.0	2	20	1.65	60	2	0.8	34.2	37.0	27.2	28	182	-19	-18	-24	-61	-59	0	0	6	1
20.0	20.0	20.0	0.1	4.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.2	36.9	26.5	42	201	-28	-20	-28	-64	-62	0	0	8	2
20.0	20.0	20.0	0.1	4.0	2	60	1.65	60	2	0.8	34.1	36.9	27.2	14	171	-9	-17	-25	-61	-59	0	0	3	3
20.0	20.0	20.0	0.1	4.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.2	36.9	26.4	22	187	-15	-19	-29	-63	-61	0	0	4	4
20.0	20.0	20.0	0.1	8.0	2	20	1.65	60	2	0.8	28.5	36.8	24.4	0	97	0	-9	-16	-36	-36	0	-1	0	1
20.0	20.0	20.0	0.1	8.0	1	20	1.80	75	2	1.0	29.7	36.8	24.4	0	116	0	-11	-20	-43	-42	0	0	0	2
20.0	20.0	20.0	0.1	8.0	2	60	1.65	60	2	0.8	27.5	36.8	23.8	0	86	0	-8	-15	-32	-31	0	-1	0	3
20.0	20.0	20.0	0.1	8.0	1	60	1.80	75	2	1.0	28.4	36.8	23.9	0	102	0	-9	-18	-37	-37	0	-1	0	4
20.0	20.0	20.0	0.1	8.0	2	20	1.65	60	2	0.8	34.2	37.0	27.2	34	182	-23	-17	-22	-62	-59	0	0	7	1
20.0	20.0	20.0	0.1	8.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.3	36.9	26.5	48	201	-32	-18	-25	-64	-62	0	0	10	2
20.0	20.0	20.0	0.1	8.0	2	60	1.65	60	2	0.8	34.1	36.9	27.2	19	171	-13	-16	-22	-61	-59	0	0	4	3
20.0	20.0	20.0	0.1	8.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.2	36.9	26.5	28	187	-19	-17	-26	-64	-62	0	0	6	4
20.0	20.0	20.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	28.8	36.8	24.5	0	97	0	-8	-14	-38	-37	0	-1	0	1
20.0	20.0	20.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	30.0	36.8	24.6	0	116	0	-10	-18	-44	-44	0	0	0	2
20.0	20.0	20.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	27.8	36.8	24.0	0	86	0	-7	-13	-33	-32	0	-1	0	3
20.0	20.0	20.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	28.8	36.8	24.0	0	102	0	-8	-17	-39	-38	0	-1	0	4
20.0	20.0	20.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	34.3	37.0	27.3	38	182	-26	-15	-20	-62	-59	0	0	9	1
20.0	20.0	20.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.3	37.0	26.5	54	201	-36	-17	-22	-64	-62	0	0	12	2
20.0	20.0	20.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	34.2	36.9	27.2	24	171	-16	-14	-20	-61	-59	0	0	6	3
20.0	20.0	20.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.2	36.9	26.5	34	187	-23	-15	-23	-64	-62	0	0	7	4
20.0	20.0	20.0	0.1	16.0	2	20	1.65	60	2	0.8	29.1	36.8	24.7	0	97	0	-7	-12	-39	-38	0	0	0	1
20.0	20.0	20.0	0.1	16.0	1	20	1.80	75	2	1.0	30.4	36.8	24.7	0	116	0	-9	-16	-46	-45	0	0	0	2
20.0	20.0	20.0	0.1	16.0	2	60	1.65	60	2	0.8	28.1	36.8	24.1	0	86	0	-6	-11	-34	-34	0	-1	0	3
20.0	20.0	20.0	0.1	16.0	1	60	1.80	75	2	1.0	29.1	36.8	24.1	0	102	0	-8	-15	-40	-39	0	0	0	4
20.0	20.0	20.0	0.1	16.0	2	20	1.65	60	2	0.8	34.3	37.0	27.3	44	182	-29	-13	-17	-62	-60	0	0	11	1
20.0	20.0	20.0	0.1	16.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.3	37.0	26.5	60	201	-40	-15	-20	-64	-62	0	0	15	2
20.0	20.0	20.0	0.1	16.0	2	60	1.65	60	2	0.8	34.2	37.0	27.3	29	171	-19	-13	-18	-62	-59	0	0	8	3
20.0	20.0	20.0	0.1	16.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.3	36.9	26.5	40	187	-27	-14	-21	-64	-62	0	0	10	4
20.0	20.0	20.0	0.1	20.0	2	20	1.65	60	2	0.8	29.4	36.8	24.8	0	97	0	-6	-11	-40	-39	0	0	0	1
20.0	20.0	20.0	0.1	20.0	1	20	1.80	75	2	1.0	30.7	36.8	24.9	0	116	0	-8	-14	-47	-46	0	0	0	2
20.0	20.0	20.0	0.1	20.0	2	60	1.65	60	2	0.8	28.4	36.8	24.3	0	86	0	-6	-10	-36	-35	0	-1	0	3
20.0	20.0	20.0	0.1	20.0	1	60	1.80	75	2	1.0	29.4	36.8	24.3	0	102	0	-7	-13	-42	-41	0	0	0	4
20.0	20.0	20.0	0.1	20.0	2	20	1.65	60	2	0.8	34.4	37.0	27.3	49	182	-33	-12	-15	-62	-60	0	0	14	1
20.0	20.0	20.0	0.1	20.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.4	37.0	26.5	66	201	-44	-13	-17	-64	-62	0	0	18	2
20.0	20.0	20.0	0.1	20.0	2	60	1.65	60	2	0.8	34.3	37.0	27.3	33	171	-22	-11	-16	-62	-59	0	0	10	3
20.0	20.0	20.0	0.1	20.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.3	36.9	26.5	46	187	-31	-12	-18	-64	-62	0	0	12	4

Tab.11: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v am Beispiel von 4 verschiedenen Personen.

T a	T mrt	V	e i	AL	GR	GE	KP	I ci	T sk	T C	T ci	WS	H	E Sw	E Re	E D	Q	L	N	KO	B P	
20.0	20.0	0.0	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	36.8	25.7	0	97	0	-8	-16	-46	-27	0	0	0	1
20.0	20.0	0.0	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	36.8	25.7	0	116	0	-10	-20	-55	-31	0	0	0	2
20.0	20.0	0.0	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	36.8	25.0	0	86	0	-7	-14	-41	-23	0	-1	0	3
20.0	20.0	0.0	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	36.8	25.0	0	102	0	-8	-18	-48	-28	0	0	0	4
20.0	20.0	0.0	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	37.0	28.2	64	182	-43	-15	-17	-68	-38	0	0	22	1
20.0	20.0	0.0	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	37.0	27.4	79	201	-53	-17	-19	-71	-41	0	0	25	2
20.0	20.0	0.0	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	37.0	28.2	48	171	-32	-14	-18	-68	-38	0	0	17	3
20.0	20.0	0.0	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	36.9	27.4	58	187	-39	-15	-21	-71	-40	0	0	18	4
20.0	20.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	36.8	24.5	0	97	0	-8	-14	-38	-37	0	-1	0	1
20.0	20.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	36.8	24.6	0	116	0	-10	-18	-44	-44	0	0	0	2
20.0	20.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	36.8	24.0	0	86	0	-7	-13	-33	-32	0	-1	0	3
20.0	20.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	36.8	24.0	0	102	0	-8	-17	-39	-38	0	-1	0	4
20.0	20.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	37.0	27.3	38	182	-26	-15	-20	-62	-59	0	0	9	1
20.0	20.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	37.0	26.5	54	201	-36	-17	-22	-64	-62	0	0	12	2
20.0	20.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	36.9	27.2	24	171	-16	-14	-20	-61	-59	0	0	6	3
20.0	20.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	36.9	26.5	34	187	-23	-15	-23	-64	-62	0	0	7	4
20.0	20.0	0.2	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	36.8	24.0	0	97	0	-8	-14	-34	-41	0	-1	0	1
20.0	20.0	0.2	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	36.8	24.1	0	116	0	-10	-18	-40	-49	0	0	0	2
20.0	20.0	0.2	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	36.8	23.5	0	86	0	-7	-12	-30	-36	0	-1	0	3
20.0	20.0	0.2	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	36.8	23.6	0	102	0	-8	-16	-35	-43	0	-1	0	4
20.0	20.0	0.2	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	37.0	26.8	26	182	-18	-15	-20	-59	-70	0	0	6	1
20.0	20.0	0.2	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	36.9	26.1	42	201	-28	-17	-23	-60	-73	0	0	8	2
20.0	20.0	0.2	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	36.9	26.8	12	171	-8	-14	-21	-58	-70	0	0	3	3
20.0	20.0	0.2	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	36.9	26.0	22	187	-15	-15	-24	-60	-72	0	0	4	4
20.0	20.0	0.4	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	36.8	23.4	0	97	0	-8	-13	-29	-47	0	-1	0	1
20.0	20.0	0.4	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	36.8	23.4	0	116	0	-10	-17	-34	-55	0	-1	0	2
20.0	20.0	0.4	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	36.8	23.0	0	86	0	-7	-12	-26	-41	0	-1	0	3
20.0	20.0	0.4	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	36.8	23.0	0	102	0	-8	-15	-30	-48	0	-1	0	4
20.0	20.0	0.4	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	37.0	26.1	12	182	-8	-15	-20	-54	-84	0	0	2	1
20.0	20.0	0.4	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	36.9	25.5	26	201	-17	-17	-24	-55	-88	0	0	4	2
20.0	20.0	0.4	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	36.9	26.0	0	171	0	-14	-20	-53	-83	0	0	0	3
20.0	20.0	0.4	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	36.9	25.4	6	187	-4	-15	-24	-55	-87	0	0	1	4
20.0	20.0	0.8	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	36.8	22.7	0	97	0	-8	-12	-24	-45	0	-1	0	1
20.0	20.0	0.8	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	36.8	22.7	0	116	0	-10	-16	-28	-62	0	-1	0	2
20.0	20.0	0.8	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	36.8	22.3	0	86	0	-7	-11	-21	-46	0	-1	0	3
20.0	20.0	0.8	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	36.8	22.4	0	102	0	-8	-14	-24	-55	0	-1	0	4
20.0	20.0	0.8	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	37.0	25.1	0	182	0	-15	-20	-46	-101	0	0	0	1
20.0	20.0	0.8	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	36.9	24.7	8	201	-5	-17	-24	-49	-106	0	0	1	2
20.0	20.0	0.8	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	36.9	24.8	0	171	0	-14	-18	-44	-95	0	0	0	3
20.0	20.0	0.8	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	36.9	24.5	0	187	0	-15	-23	-46	-102	0	0	0	4

Tab.12: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} am Beispiel von 4 verschiedenen Personen.

T_a	T_{mrt}	V	e_i	G	AL	GR	GE	KP	I_{cl}	T_{sk}	T_c	T_{cl}	WS	H	E_{sw}	E_{re}	E_D	Q	L	N	KO	B	P
20.0	10.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	24.7	36.8	20.1	0	97	0	-8	-10	-73	-6	0	-1	0	1
20.0	10.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	26.0	36.8	20.2	0	116	0	-10	-13	-87	-6	0	-1	0	2
20.0	10.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	23.6	36.8	19.6	0	86	0	-7	-9	-68	-2	0	-1	0	3
20.0	10.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	24.7	36.8	19.6	0	102	0	-8	-11	-81	0	0	-1	0	4
20.0	10.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	32.8	37.0	24.3	0	182	0	-15	-19	-107	-40	0	0	0	1
20.0	10.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	33.5	36.9	23.6	1	201	-1	-17	-24	-121	-39	0	0	0	2
20.0	10.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	31.8	37.0	23.7	0	171	0	-14	-18	-103	-36	0	0	0	3
20.0	10.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	32.4	36.9	23.1	0	187	0	-15	-22	-115	-34	0	0	0	4
20.0	15.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	26.7	36.8	22.3	0	97	0	-8	-12	-56	-21	0	-1	0	1
20.0	15.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	28.0	36.8	22.3	0	116	0	-10	-15	-66	-25	0	-1	0	2
20.0	15.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	25.7	36.8	21.7	0	86	0	-7	-11	-51	-17	0	-1	0	3
20.0	15.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	26.7	36.8	21.8	0	102	0	-8	-14	-61	-19	0	-1	0	4
20.0	15.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	33.8	36.9	25.9	13	182	-9	-15	-20	-87	-51	0	0	3	1
20.0	15.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.1	36.9	25.1	24	201	-16	-17	-23	-94	-51	0	0	5	2
20.0	15.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	33.6	36.9	25.8	1	171	-1	-14	-20	-86	-50	0	0	0	3
20.0	15.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.0	36.9	25.1	4	187	-3	-15	-25	-93	-51	0	0	1	4
20.0	20.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	28.8	36.8	24.5	0	97	0	-8	-14	-38	-37	0	-1	0	1
20.0	20.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	30.0	36.8	24.6	0	116	0	-10	-18	-44	-44	0	0	0	2
20.0	20.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	27.8	36.8	24.0	0	86	0	-7	-13	-33	-32	0	-1	0	3
20.0	20.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	28.8	36.8	24.0	0	102	0	-8	-17	-39	-38	0	-1	0	4
20.0	20.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	34.3	37.0	27.3	38	182	-26	-15	-20	-62	-59	0	0	9	1
20.0	20.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.3	37.0	26.5	54	201	-36	-17	-22	-64	-62	0	0	12	2
20.0	20.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	34.2	36.9	27.2	24	171	-16	-14	-20	-61	-59	0	0	6	3
20.0	20.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.2	36.9	26.5	34	187	-23	-15	-23	-64	-62	0	0	7	4
20.0	25.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	31.0	36.8	26.8	0	97	0	-8	-17	-53	-53	0	0	0	1
20.0	25.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	32.1	36.8	26.9	0	116	0	-10	-22	-63	-63	0	0	0	2
20.0	25.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	30.0	36.8	26.3	0	86	0	-7	-16	-74	-49	0	0	0	3
20.0	25.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	30.9	36.8	26.3	0	102	0	-8	-20	-81	-58	0	0	0	4
20.0	25.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	34.6	37.0	28.6	67	182	-45	-15	-19	-35	-68	0	0	16	1
20.0	25.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.5	37.0	27.9	85	201	-57	-17	-21	-33	-73	0	1	18	2
20.0	25.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	34.5	37.0	28.6	52	171	-35	-14	-19	-35	-67	0	0	12	3
20.0	25.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.5	37.0	27.9	65	187	-44	-15	-22	-32	-73	0	0	14	4

Fortsetzung von Tabelle 12:

T _a	T _{mrt}	V	e _i	G	AL	GR	GE	KP	I _{cl}	T _{sk}	T _C	T _{cl}	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B	P
20.0	30.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	33.2	36.8	29.2	0	97	0	-8	-20	1	-69	0	0	0	1
20.0	30.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.3	36.8	29.2	0	116	0	-10	-25	3	-84	0	0	0	2
20.0	30.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	32.2	36.8	28.7	0	86	0	-7	-18	5	-65	0	0	0	3
20.0	30.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	33.1	36.8	28.7	0	102	0	-8	-23	8	-78	0	0	0	4
20.0	30.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	34.9	37.1	30.1	97	182	-65	-15	-18	-7	-77	0	1	22	1
20.0	30.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.7	37.0	29.5	118	201	-80	-17	-19	0	-86	0	1	25	2
20.0	30.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	34.9	37.1	30.0	82	171	-55	-14	-18	-7	-76	0	1	19	3
20.0	30.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.7	37.0	29.4	98	187	-66	-15	-21	1	-85	0	1	21	4
20.0	35.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	34.8	36.8	31.3	11	97	-8	-8	-22	24	-84	0	1	3	1
20.0	35.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	34.8	36.9	31.0	29	116	-20	-10	-25	35	-98	0	1	6	2
20.0	35.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	34.5	36.8	31.2	0	86	0	-7	-22	26	-83	0	0	0	3
20.0	35.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.8	36.8	31.0	9	102	-6	-8	-26	36	-97	0	1	2	4
20.0	35.0	0.1	12.0	2	20	1.65	60	2	0.8	35.2	37.2	31.6	130	182	-87	-15	-16	22	-86	0	1	29	1
20.0	35.0	0.1	12.0	1	20	1.80	75	2	1.0	35.0	37.1	31.0	154	201	-103	-17	-18	35	-98	0	1	32	2
20.0	35.0	0.1	12.0	2	60	1.65	60	2	0.8	35.2	37.1	31.5	114	171	-77	-14	-17	23	-85	0	1	26	3
20.0	35.0	0.1	12.0	1	60	1.80	75	2	1.0	34.9	37.0	31.0	133	187	-89	-15	-19	35	-98	0	1	28	4

Tab.13: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers im Ruhestadium in Abhängigkeit vom Typus der Bettdecke bei der Bedeckungsart a (nur Kopf unbedeckt) und Rückenlage.

T _a	T _{mrt}	V	e	G	AL	GR	GE	KP	I	T _{sk}	T _C	T _{ci}	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B	Z
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	34.8	36.9	20.3	15	72	-10	-6	-13	-26	-16	0	1	11	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	34.9	36.9	19.9	20	72	-14	-6	-11	-25	-16	0	1	17	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	34.3	36.8	21.6	0	72	0	-6	-14	-31	-20	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	20	1.80	75	1	3.9	34.7	36.9	20.3	27	91	-18	-8	-14	-30	-19	0	1	17	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	20	1.80	75	1	4.7	34.8	36.9	19.9	34	91	-23	-8	-12	-29	-18	0	1	24	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	20	1.80	75	1	2.4	34.5	36.8	21.6	5	91	-3	-8	-17	-37	-24	0	0	2	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	60	1.65	60	1	3.9	34.5	36.8	20.3	0	61	0	-5	-14	-25	-16	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	60	1.65	60	1	4.7	34.7	36.8	19.8	0	61	0	-5	-13	-24	-16	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	60	1.65	60	1	2.4	31.9	36.8	21.0	0	61	0	-5	-12	-26	-17	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	60	1.80	75	1	3.9	34.7	36.8	20.3	3	77	-2	-6	-16	-30	-19	0	1	2	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	60	1.80	75	1	4.7	34.7	36.8	19.8	8	77	-5	-6	-15	-29	-18	0	1	5	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	60	1.80	75	1	2.4	33.0	36.8	21.3	0	77	0	-6	-15	-34	-21	0	0	0	0.93

Tab.14: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers im Ruhestadium in Abhängigkeit vom Typus der Bettdecke bei der Bedeckungsart a (nur Kopf unbedeckt) und Seitenlage.

T _a	T _{mrt}	V	e _i	G	AL	GR	GE	KP	I _{ci}	T _{sk}	T _C	T _{ci}	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B	Z
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	34.2	36.8	20.3	0	72	0	-6	-17	-30	-19	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	34.7	36.8	19.8	0	72	0	-6	-16	-30	-19	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	31.6	36.8	21.0	0	72	0	-6	-14	-31	-20	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	20	1.80	75	1	3.9	34.7	36.8	20.3	1	91	-1	-8	-20	-36	-23	0	1	1	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	20	1.80	75	1	4.7	34.7	36.8	19.8	7	91	-5	-8	-18	-35	-22	0	1	4	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	20	1.80	75	1	2.4	32.7	36.8	21.2	0	91	0	-8	-18	-40	-25	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	60	1.65	60	1	3.9	31.8	36.7	19.9	0	61	0	-5	-14	-25	-16	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	60	1.65	60	1	4.7	32.4	36.7	19.6	0	61	0	-5	-14	-25	-16	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	60	1.65	60	1	2.4	29.5	36.7	20.5	0	61	0	-5	-12	-26	-17	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	60	1.80	75	1	3.9	32.8	36.7	20.1	0	77	0	-6	-18	-32	-20	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	60	1.80	75	1	4.7	33.6	36.7	19.7	0	77	0	-6	-17	-32	-21	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	60	1.80	75	1	2.4	30.4	36.8	20.7	0	77	0	-6	-15	-33	-22	0	0	0	0.93

Tab.15: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers im Ruhestadium in Abhängigkeit von der Bedeckungsart mit einer Daunendecke (Typ 2) bei Rückenlage.

T _a	T _{mrt}	V	e	G	AL	GR	GE	KP	I	T _{sk}	T _C	T _{cl}	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B	Z
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	34.9	36.9	19.9	20	72	-14	-6	-11	-25	-16	0	1	17	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	20	1.80	75	1	4.7	34.8	36.9	19.9	34	91	-23	-8	-12	-29	-18	0	1	24	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	60	1.65	60	1	4.7	34.7	36.8	19.8	0	61	0	-5	-13	-24	-16	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	1	60	1.80	75	1	4.7	34.7	36.8	19.8	8	77	-5	-6	-15	-29	-18	0	1	5	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	33.5	36.8	19.7	0	72	0	-6	-12	-33	-20	0	0	0	0.82
18.0	18.0	0.05	10.3	1	20	1.80	75	1	4.7	34.4	36.8	19.8	0	91	0	-8	-15	-41	-25	0	0	0	0.82
18.0	18.0	0.05	10.3	2	60	1.65	60	1	4.7	31.1	36.8	19.4	0	61	0	-5	-10	-28	-17	0	0	0	0.82
18.0	18.0	0.05	10.3	1	60	1.80	75	1	4.7	32.3	36.8	19.5	0	77	0	-6	-13	-35	-22	0	0	0	0.82
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	30.8	36.8	19.4	0	72	0	-6	-10	-34	-21	0	0	0	0.72
18.0	18.0	0.05	10.3	1	20	1.80	75	1	4.7	31.8	36.8	19.5	0	91	0	-8	-13	-44	-27	0	0	0	0.72
18.0	18.0	0.05	10.3	2	60	1.65	60	1	4.7	28.8	36.8	19.1	0	61	0	-5	-9	-29	-18	0	-1	0	0.72
18.0	18.0	0.05	10.3	1	60	1.80	75	1	4.7	29.7	36.8	19.2	0	77	0	-6	-11	-37	-23	0	0	0	0.72
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	29.5	36.8	19.2	0	72	0	-6	-9	-35	-21	0	0	0	0.66
18.0	18.0	0.05	10.3	1	20	1.80	75	1	4.7	30.5	36.9	19.3	0	91	0	-8	-12	-44	-27	0	0	0	0.66
18.0	18.0	0.05	10.3	2	60	1.65	60	1	4.7	27.8	36.8	19.0	0	61	0	-5	-8	-29	-18	0	-1	0	0.66
18.0	18.0	0.05	10.3	1	60	1.80	75	1	4.7	28.5	36.8	19.1	0	77	0	-6	-10	-37	-23	0	-1	0	0.66

Tab.16: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers im Ruhestadium in Abhängigkeit von der Lufttemperatur im Bereich $10^{\circ}\text{C} \leq t \leq 18^{\circ}\text{C}$ am Beispiel einer jungen Frau (Pers. 1) bei verschiedenartigen Bettdecken und unterschiedlicher Bedeckungsart bei Rückenlage.

T_a	T_{mrt}	v	e_i	G	AL	GR	GE	KP	I	T_{sk}	T_c	T_{ci}	WS	H	E_{sw}	E_{re}	E_D	Q	L	N	KO	B	Z
20.0	20.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	35.0	36.9	22.1	23	72	-15	-6	-12	-23	-14	0	1	16	0.93
20.0	20.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	35.0	36.9	21.6	25	72	-17	-6	-11	-22	-14	0	1	21	0.93
20.0	20.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	34.7	36.8	23.2	7	72	-4	-6	-14	-28	-18	0	1	4	0.93
20.0	20.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	34.5	36.8	22.0	0	72	0	-6	-14	-32	-19	0	0	0	0.82
20.0	20.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	34.5	36.8	21.6	0	72	0	-6	-13	-31	-19	0	0	0	0.82
20.0	20.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	32.8	36.8	22.8	0	72	0	-6	-13	-32	-20	0	0	0	0.82
22.0	22.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	35.1	36.9	23.8	29	72	-20	-6	-12	-20	-13	0	1	21	0.93
22.0	22.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	35.1	36.9	23.4	33	72	-22	-6	-10	-20	-12	0	1	27	0.93
22.0	22.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	34.8	36.9	24.8	16	72	-11	-6	-14	-25	-16	0	1	9	0.93
22.0	22.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	34.7	36.9	23.7	9	72	-6	-6	-13	-28	-17	0	1	7	0.82
22.0	22.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	34.7	36.9	23.3	10	72	-7	-6	-12	-28	-17	0	1	8	0.82
22.0	22.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	34.3	36.8	24.6	0	72	0	-6	-14	-32	-19	0	0	0	0.82
22.0	22.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	35.2	36.9	25.2	38	72	-25	-7	-11	-18	-11	0	1	27	0.93
24.0	24.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	35.2	36.9	25.2	40	72	-27	-7	-9	-17	-10	0	1	32	0.93
24.0	24.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	35.0	36.9	26.3	25	72	-17	-7	-13	-22	-13	0	1	13	0.93
24.0	24.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	34.9	36.9	25.5	20	72	-13	-7	-12	-24	-14	0	1	14	0.82
24.0	24.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	34.9	36.9	25.1	18	72	-12	-7	-11	-24	-14	0	1	15	0.82
24.0	24.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	34.7	36.8	26.3	8	72	-5	-7	-14	-28	-16	0	1	4	0.82
26.0	26.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	35.3	36.9	27.2	45	72	-30	-7	-10	-15	-9	0	1	32	0.93
26.0	26.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	35.3	36.9	27.0	43	72	-29	-7	-9	-14	-8	0	1	35	0.93
26.0	26.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	35.1	36.9	27.9	32	72	-21	-7	-13	-18	-11	0	1	17	0.93
26.0	26.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	35.1	36.9	27.2	28	72	-19	-7	-12	-20	-12	0	1	20	0.82
26.0	26.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	35.1	36.9	26.9	30	72	-20	-7	-10	-20	-12	0	1	24	0.82
26.0	26.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	34.9	36.9	27.9	21	72	-14	-7	-13	-23	-14	0	1	11	0.82

Tab.17: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers im Ruhestadium in Abhängigkeit von der Lufttemperatur im Bereich $20^{\circ}\text{C} \leq t \leq 26^{\circ}\text{C}$ am Beispiel einer jungen Frau (Pers. 1) bei verschiedenartigen Bettdecken und unterschiedlicher Bedeckungsart bei Rückenlage.

T_a	T_{mrt}	V	e	G	AL	GR	GE	KP	I_{cl}	T_{sk}	T_c	T_{cl}	WS	H	E_{sw}	E_{re}	E_D	Q	L	N	KO	B	Z
10.0	10.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	32.1	36.8	13.2	0	72	0	-5	-12	-32	-22	0	0	0	0.93
10.0	10.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	33.0	36.8	12.6	0	72	0	-5	-12	-32	-22	0	0	0	0.93
10.0	10.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	28.5	36.8	14.2	0	72	0	-5	-9	-34	-23	0	-1	0	0.93
10.0	10.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	27.0	36.8	12.4	0	72	0	-5	-8	-35	-23	0	-1	0	0.82
10.0	10.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	27.5	36.8	12.0	0	72	0	-5	-8	-35	-23	0	-1	0	0.82
10.0	10.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	25.0	36.9	13.4	0	72	0	-5	-7	-35	-24	0	-1	0	0.82
12.0	12.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	33.4	36.8	15.1	0	72	0	-5	-13	-32	-21	0	0	0	0.93
12.0	12.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	34.4	36.8	14.5	0	72	0	-5	-13	-32	-21	0	0	0	0.93
12.0	12.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	30.0	36.8	16.0	0	72	0	-5	-10	-33	-22	0	0	0	0.93
12.0	12.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	28.6	36.8	14.3	0	72	0	-5	-9	-34	-23	0	-1	0	0.82
12.0	12.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	29.0	36.8	13.9	0	72	0	-5	-9	-35	-23	0	0	0	0.82
12.0	12.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	26.6	36.9	15.3	0	72	0	-5	-8	-35	-23	0	-1	0	0.82
14.0	14.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	34.5	36.8	16.9	1	72	-1	-6	-14	-31	-20	0	0	1	0.93
14.0	14.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	34.6	36.8	16.3	4	72	-3	-6	-13	-30	-19	0	0	3	0.93
14.0	14.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	31.4	36.8	17.9	0	72	0	-6	-12	-33	-22	0	0	0	0.93
14.0	14.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	30.1	36.8	16.2	0	72	0	-6	-10	-34	-22	0	0	0	0.82
14.0	14.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	30.5	36.8	15.8	0	72	0	-6	-10	-34	-22	0	0	0	0.82
14.0	14.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	28.2	36.8	17.1	0	72	0	-6	-9	-34	-22	0	-1	0	0.82
16.0	16.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	34.6	36.8	18.6	5	72	-3	-6	-14	-28	-18	0	0	4	0.93
16.0	16.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	34.8	36.9	18.1	13	72	-9	-6	-12	-27	-18	0	1	11	0.93
16.0	16.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	32.9	36.8	19.7	0	72	0	-6	-13	-32	-21	0	0	0	0.93
16.0	16.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	31.6	36.8	18.2	0	72	0	-6	-11	-33	-21	0	0	0	0.82
16.0	16.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	32.0	36.8	17.7	0	72	0	-6	-11	-33	-21	0	0	0	0.82
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	29.8	36.8	19.0	0	72	0	-6	-10	-34	-22	0	0	0	0.82
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	34.8	36.9	20.3	15	72	-10	-6	-13	-26	-16	0	1	11	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	34.9	36.9	19.9	20	72	-14	-6	-11	-25	-16	0	1	17	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	34.3	36.8	21.6	0	72	0	-6	-14	-31	-20	0	0	0	0.93
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	3.9	33.1	36.8	20.1	0	72	0	-6	-13	-33	-20	0	0	0	0.82
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	4.7	33.5	36.8	19.7	0	72	0	-6	-12	-33	-20	0	0	0	0.82
18.0	18.0	0.05	10.3	2	20	1.65	60	1	2.4	31.3	36.8	20.9	0	72	0	-6	-12	-33	-21	0	0	0	0.82

Tab.18: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung bei polaren Klimabedingungen am Beispiel von 4 verschiedenen gehenden Personen.

T _a	T _{mrt}	V	e _i	G	AL	GR	GE	KP	I _{cl}	T _{sk}	T _c	T _{cl}	WS	H	E _{sw}	E _{re}	E _D	Q	L	N	KO	B	P
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	20	1.65	60	3	4.5	34.3	37.4	-33.4	176	402	-118	-30	-11	-84	-158	0	1	61	1
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	20	1.80	75	3	4.5	31.5	37.5	-33.6	154	421	-103	-32	-13	-98	-175	0	1	54	2
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	60	1.65	60	3	4.5	34.2	37.4	-33.4	159	391	-107	-30	-12	-84	-157	0	1	56	3
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	60	1.80	75	3	4.5	31.3	37.4	-33.6	133	407	-89	-31	-15	-98	-174	0	1	47	4
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	20	1.80	75	3	4.0	30.4	37.5	-33.2	109	421	-73	-32	-16	-101	-199	0	1	36	2
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	60	1.65	60	3	4.0	32.2	37.5	-33.0	127	391	-85	-30	-14	-87	-176	0	1	45	3
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	60	1.80	75	3	4.0	30.2	37.5	-33.2	88	407	-59	-31	-18	-101	-198	0	1	30	4
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	20	1.80	75	3	3.5	29.8	37.5	-32.5	85	421	-57	-32	-19	-98	-216	0	1	26	2
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	60	1.80	75	3	3.5	29.7	37.5	-32.5	64	407	-43	-31	-20	-98	-215	0	0	20	4
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	20	1.65	60	3	3.0	30.5	37.6	-31.6	100	402	-67	-30	-16	-82	-207	0	1	30	1
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	60	1.80	75	3	3.0	29.1	37.5	-31.7	55	421	-37	-32	-20	-95	-236	0	0	15	2
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	60	1.65	60	3	3.0	30.2	37.6	-31.6	85	391	-57	-30	-16	-82	-206	0	1	26	3
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	20	1.80	75	3	2.5	28.1	37.7	-30.7	38	402	-26	-30	-17	-86	-242	0	-1	11	1
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	20	1.65	60	3	2.5	25.6	37.6	-31.0	0	421	0	-32	-20	-99	-270	0	-1	0	2
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	60	1.80	75	3	2.5	27.9	37.6	-30.7	24	391	-16	-30	-18	-86	-241	0	-1	7	3
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	60	1.65	60	3	2.0	12.0	37.6	-31.2	0	407	0	-31	-17	-98	-260	0	-1	0	4
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	20	1.65	60	3	2.0	12.0	37.8	-31.3	0	402	0	-30	-7	-92	-272	0	-1	0	1
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	20	1.80	75	3	2.0	10.7	37.7	-32.0	0	421	0	-32	-6	-103	-280	0	-1	0	2
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	60	1.65	60	3	2.0	10.7	37.8	-31.5	0	391	0	-30	-6	-91	-263	0	-1	0	3
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	60	1.80	75	3	2.0	5.5	37.7	-32.2	0	407	0	-31	-5	-101	-269	0	-1	0	4
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	20	1.65	60	3	1.5	6.8	37.8	-30.3	0	402	0	-30	-5	-88	-278	0	-1	0	1
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	20	1.80	75	3	1.5	2.2	37.7	-31.1	0	421	0	-32	-4	-98	-287	0	-1	0	2
-37.0	-51.0	4.1	0.2	2	60	1.65	60	3	1.5	5.6	37.8	-30.5	0	391	0	-30	-5	-87	-269	0	-1	0	3
-37.0	-51.0	4.1	0.2	1	60	1.80	75	3	1.5	0.9	37.7	-31.3	0	407	0	-31	-4	-96	-276	0	-1	0	4

Tab.19: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung bei subtropischen Klimabedingungen und heller Kleidung am Beispiel von 4 verschiedenen stehenden Personen.

T_a	T_{mrt}	V	e_i	G	AL	GR	GE	KP	I_{cl}	T_{sk}	T_c	T_{cl}	WS	H	E_{sw}	E_{re}	E_d	Q	L	N	KO	B	P
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	0.1	36.8	37.5	37.6	294	115	-197	-15	-22	30	89	0	1	15	1
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	0.1	36.4	37.3	37.3	364	134	-245	-18	-24	39	114	0	1	16	2
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	0.1	36.7	37.5	37.6	279	104	-188	-14	-22	30	89	0	1	14	3
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	0.1	36.4	37.3	37.4	344	120	-231	-16	-25	39	113	0	1	15	4
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	0.2	36.7	37.5	38.2	283	115	-190	-15	-21	28	84	0	1	16	1
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	0.2	36.3	37.3	37.9	350	134	-235	-18	-24	36	107	0	1	18	2
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	0.2	36.7	37.4	38.2	269	104	-181	-14	-21	28	84	0	1	15	3
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	0.2	36.3	37.2	38.0	331	120	-222	-16	-24	36	106	0	1	17	4
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	0.4	36.6	37.4	38.8	261	115	-175	-15	-20	24	72	0	1	19	1
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	0.4	36.2	37.2	38.7	321	134	-216	-15	-23	30	92	0	1	21	2
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	0.4	36.6	37.4	38.8	247	104	-166	-14	-20	24	72	0	1	18	3
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	0.4	36.2	37.2	38.7	301	120	-203	-16	-23	30	91	0	1	19	4
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	0.6	36.5	37.4	39.2	237	115	-159	-15	-19	19	60	0	1	21	1
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	0.6	36.1	37.2	39.1	291	134	-195	-18	-22	24	76	0	1	23	2
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	0.6	36.5	37.3	39.2	222	104	-149	-14	-20	19	60	0	1	20	3
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	0.6	36.1	37.2	39.1	271	120	-182	-16	-22	24	76	0	1	21	4
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	0.8	36.3	37.3	39.5	214	115	-144	-15	-19	15	49	0	1	23	1
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	0.8	36.0	37.2	39.4	260	134	-175	-18	-21	19	61	0	1	24	2
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	0.8	36.3	37.2	39.5	198	104	-133	-14	-19	15	49	0	1	21	3
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	0.8	36.0	37.1	39.4	240	120	-162	-16	-22	19	61	0	1	22	4
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	1.0	36.3	37.3	39.7	199	115	-134	-15	-18	12	41	0	1	25	1
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	1.0	35.9	37.1	39.6	240	134	-162	-18	-21	15	51	0	1	26	2
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	1.0	36.3	37.2	39.7	184	104	-124	-14	-19	12	41	0	1	23	3
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	1.0	35.9	37.1	39.6	221	120	-149	-16	-21	15	51	0	1	24	4

Fortsetzung der Tabelle 19:

T a	T mrt	V	e I	AL	GR	GE	KP	I	sk	T C	T cl	WS	H	E Sw	E Re	E D	Q	L	N	KO	B P
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	1.2	36.2	39.8	187	115	-125	-15	-18	9	34	0	1	26
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	1.2	37.1	39.7	224	134	-151	-18	-20	12	43	0	1	28
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	1.2	37.2	39.8	171	104	-115	-14	-18	9	35	0	1	24
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	1.2	37.1	39.7	205	120	-138	-16	-21	12	43	0	1	25
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	1.4	36.1	39.9	178	115	-120	-15	-17	8	30	0	1	28
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	1.4	37.1	39.8	215	134	-144	-18	-20	10	38	0	1	30
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	1.4	36.1	39.9	163	104	-109	-14	-18	8	30	0	1	26
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	1.4	37.1	39.8	195	120	-131	-16	-20	10	38	0	1	27
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	1.6	36.1	40.0	177	115	-119	-15	-17	7	29	0	1	31
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	1.6	37.1	39.9	211	134	-142	-18	-19	9	36	0	1	32
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	1.6	37.2	40.0	161	104	-108	-14	-17	7	29	0	1	28
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	1.6	37.0	40.0	192	120	-129	-16	-20	9	36	0	1	29
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	1.8	37.1	40.1	177	115	-119	-15	-16	7	29	0	1	34
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	1.8	37.1	40.0	213	134	-143	-18	-18	8	36	0	1	35
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	1.8	37.2	40.1	162	104	-109	-14	-17	7	29	0	1	31
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	1.8	37.1	40.0	194	120	-130	-16	-19	8	36	0	1	32
41.0	40.6	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	2.0	37.2	40.2	176	115	-118	-15	-15	6	28	0	1	36
41.0	40.6	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	2.0	37.1	40.1	212	134	-143	-18	-17	8	35	0	1	38
41.0	40.6	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	2.0	37.2	40.2	161	104	-109	-14	-16	6	28	0	1	33
41.0	40.6	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	2.0	37.0	40.1	192	120	-129	-16	-18	8	35	0	1	35

Tab.20: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung bei subtropischen Klimabedingungen und dunkler Kleidung am Beispiel von 4 verschiedenen stehenden Personen.

T _a	T _{mrt}	V	e	G	AL	GR	GE	KP	I _{cl}	T _{sk}	T _C	T _{cl}	WS	H	E _{sw}	E _{re}	E _D	Q	L	N	KO	B	P
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	0.1	37.3	37.9	38.7	416	115	-279	-15	-21	125	76	0	1	20	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	0.1	36.8	37.5	38.4	511	134	-344	-18	-23	150	101	0	1	22	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	0.1	37.3	37.8	38.7	402	104	-270	-14	-21	125	77	0	1	19	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	0.1	36.8	37.5	38.4	492	120	-330	-16	-24	150	100	0	1	21	4
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	0.2	37.2	37.8	39.7	397	115	-267	-15	-20	121	67	0	1	22	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	0.2	36.7	37.5	39.4	487	134	-327	-18	-22	145	89	0	1	24	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	0.2	37.2	37.7	39.7	383	104	-257	-14	-20	121	67	0	1	21	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	0.2	36.8	37.5	39.4	468	120	-314	-16	-23	145	89	0	1	23	4
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	0.4	37.0	37.7	40.8	357	115	-240	-15	-19	116	44	0	1	26	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	0.4	36.6	37.4	40.5	436	134	-293	-18	-21	139	60	0	1	27	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	0.4	37.0	37.6	40.7	342	104	-230	-14	-19	116	44	0	1	25	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	0.4	36.6	37.4	40.6	417	120	-280	-16	-22	139	60	0	1	26	4
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	0.6	36.8	37.6	41.4	316	115	-212	-15	-18	111	21	0	1	28	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	0.6	36.4	37.3	41.2	384	134	-258	-18	-20	132	31	0	1	30	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	0.6	36.8	37.5	41.4	301	104	-202	-14	-19	111	21	0	1	26	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	0.6	36.5	37.3	41.2	364	120	-245	-16	-21	132	30	0	1	28	4
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	0.8	36.7	37.5	41.8	276	115	-186	-15	-18	103	1	0	1	29	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	0.8	36.3	37.3	41.7	334	134	-224	-18	-20	122	6	0	1	31	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	0.8	36.7	37.4	41.8	261	104	-176	-14	-18	103	1	0	1	27	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	0.8	36.3	37.2	41.7	315	120	-211	-16	-20	122	6	0	1	29	4
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	1.0	36.5	37.4	42.1	249	115	-168	-15	-17	101	-15	0	1	30	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	1.0	36.2	37.2	42.0	301	134	-203	-18	-19	120	-14	0	1	32	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	1.0	36.5	37.3	42.1	235	104	-158	-14	-18	101	-15	0	1	29	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	1.0	36.2	37.2	42.0	282	120	-189	-16	-20	120	-14	0	1	30	4

Fortsetzung der Tabelle 20:

T a	T mrt	V	e I	G	AL	GR	GE	KP	I	cl	T sk	T C	T cl	WS	H	E Sw	E Re	E D	Q	L	N	KO	B P
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	1.2	36.4	37.3	42.3	229	115	-154	-15	-17	97	-26	0	1	32	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	1.2	36.1	37.2	42.2	275	134	-185	-18	-19	115	-27	0	1	33	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	1.2	36.4	37.3	42.3	215	104	-144	-14	-17	97	-26	0	1	30	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	1.2	36.1	37.1	42.3	255	120	-172	-16	-20	115	-27	0	1	31	4
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	1.4	36.4	37.3	42.5	216	115	-145	-15	-16	94	-32	0	1	33	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	1.4	36.0	37.2	42.4	259	134	-174	-18	-18	111	-36	0	1	35	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	1.4	36.3	37.3	42.5	201	104	-135	-14	-17	94	-32	0	1	31	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	1.4	36.0	37.1	42.4	239	120	-161	-16	-19	111	-36	0	1	32	4
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	1.6	36.3	37.3	42.7	211	115	-142	-15	-16	97	-38	0	1	36	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	1.6	36.0	37.1	42.6	255	134	-171	-18	-17	114	-43	0	1	38	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	1.6	36.3	37.2	42.7	197	104	-132	-14	-16	97	-38	0	1	34	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	1.6	36.0	37.1	42.6	235	120	-158	-16	-18	114	-43	0	1	35	4
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	1.8	36.3	37.3	42.8	212	115	-143	-15	-15	103	-45	0	1	40	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	1.8	36.0	37.1	42.7	255	134	-172	-18	-16	122	-51	0	1	42	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	1.8	36.3	37.2	42.8	198	104	-133	-14	-15	103	-45	0	1	37	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	1.8	36.0	37.1	42.8	235	120	-158	-16	-17	122	-51	0	1	38	4
41.0	51.9	2.0	12.6	2	20	1.65	60	1	2.0	36.3	37.3	42.9	210	115	-141	-15	-14	106	-50	0	1	43	1
41.0	51.9	2.0	12.6	1	20	1.80	75	1	2.0	36.0	37.1	42.9	253	134	-170	-18	-15	125	-57	0	1	45	2
41.0	51.9	2.0	12.6	2	60	1.65	60	1	2.0	36.3	37.2	42.9	195	104	-131	-14	-15	106	-50	0	1	40	3
41.0	51.9	2.0	12.6	1	60	1.80	75	1	2.0	36.0	37.1	42.9	233	120	-157	-16	-16	125	-57	0	1	41	4

Tab.21: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} der Kleidung bei feuchttropischen Klimabedingungen am Beispiel von 4 versch. sitzenden Personen.

T _a	T _{mrt}	V	e _i	G	AL	GR	GE	KP	I _{cl}	T _{sk}	T _C	T _{ci}	WS	H	E _{SW}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B	P
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	0.1	35.4	37.0	35.2	75	97	-51	-6	-9	-10	-22	0	1	12	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	0.1	35.3	36.9	35.1	99	116	-67	-7	-10	-10	-22	0	1	14	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	0.1	35.4	36.9	35.2	60	86	-40	-5	-10	-9	-21	0	1	10	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	0.1	35.3	36.9	35.1	79	102	-53	-6	-11	-10	-22	0	1	11	4
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	0.2	35.5	37.0	35.0	77	97	-52	-6	-9	-9	-21	0	1	14	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	0.2	35.3	36.9	34.9	102	116	-69	-7	-10	-9	-21	0	1	16	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	0.2	35.4	36.9	35.0	62	86	-42	-5	-9	-9	-20	0	1	11	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	0.2	35.3	36.9	34.9	82	102	-55	-6	-11	-9	-21	0	1	13	4
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	0.4	35.5	37.0	34.8	83	97	-56	-6	-9	-8	-18	0	1	18	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	0.4	35.3	36.9	34.7	108	116	-73	-7	-10	-8	-19	0	1	20	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	0.4	35.5	36.9	34.8	68	86	-46	-5	-9	-8	-18	0	1	14	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	0.4	35.3	36.9	34.7	87	102	-59	-6	-10	-9	-19	0	1	16	4
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	0.6	35.6	37.0	34.7	89	97	-60	-6	-8	-16	-16	0	1	22	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	0.6	35.4	37.0	34.6	115	116	-77	-7	-9	-6	-16	0	1	25	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	0.6	35.6	36.9	34.7	73	86	-49	-5	-9	-6	-16	0	1	18	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	0.6	35.4	36.9	34.6	94	102	-63	-6	-10	-6	-17	0	1	20	4
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	0.8	35.6	37.0	34.6	95	97	-64	-6	-8	-5	-14	0	1	27	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	0.8	35.4	37.0	34.6	122	116	-82	-7	-9	-5	-14	0	1	30	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	0.8	35.6	37.0	34.6	80	86	-54	-5	-8	-5	-13	0	1	23	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	0.8	35.4	36.9	34.6	101	102	-68	-6	-9	-5	-14	0	1	25	4
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	1.0	35.7	37.0	34.6	100	97	-67	-6	-8	-4	-12	0	1	32	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	1.0	35.4	37.0	34.5	126	116	-85	-7	-8	-4	-12	0	1	35	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	1.0	35.6	37.0	34.6	84	86	-57	-5	-8	-4	-12	0	1	27	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	1.0	35.4	36.9	34.5	105	102	-71	-6	-9	-4	-12	0	1	29	4

Tab.22: Parameter des Energiehaushaltes des menschlichen Körpers in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangswiderstand i_{cl} der Kleidung bei feuchttropischen Klimabedingungen am Beispiel von 4 leicht arbeitenden Personen.

T _a	T _{mrt}	V	.e _i	AL	GR	GE	KP	I _{cl}	T _{sk}	T _C	T _{ci}	WS	H	E _{Sw}	E _{Re}	E _D	Q	L	N	KO	B _P		
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	0.1	35.9	37.6	35.6	308	272	-207	-16	-6	-13	-29	0	1	46	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	0.1	35.4	37.4	35.1	346	291	-233	-17	-6	-11	-24	0	1	48	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	0.1	35.9	37.6	35.6	294	261	-197	-16	-6	-13	-28	0	1	44	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	0.1	35.4	37.3	35.1	327	277	-220	-17	-7	-10	-24	0	1	45	4
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	0.2	36.0	37.6	35.4	312	272	-210	-16	-6	-13	-27	0	1	51	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	0.2	35.4	37.4	35.0	350	291	-235	-17	-6	-10	-23	0	1	54	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	0.2	35.9	37.6	35.4	297	261	-200	-16	-6	-12	-27	0	1	49	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	0.2	35.4	37.4	35.0	330	277	-222	-17	-6	-10	-23	0	1	51	4
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	0.4	36.0	37.7	35.1	321	272	-216	-16	-4	-11	-24	0	1	63	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	0.4	35.4	37.4	34.8	358	291	-240	-17	-4	-8	-20	0	1	66	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	0.4	36.0	37.6	35.1	307	261	-206	-16	-5	-11	-24	0	1	61	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	0.4	35.4	37.4	34.8	339	277	-228	-17	-5	-8	-20	0	1	62	4
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	0.6	36.1	37.7	34.9	331	272	-223	-16	-3	-9	-21	0	1	76	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	0.6	35.5	37.4	34.7	367	291	-246	-17	-3	-7	-18	0	1	79	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	0.6	36.0	37.7	34.9	316	261	-212	-16	-3	-9	-21	0	1	73	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	0.6	35.4	37.4	34.7	347	277	-233	-17	-3	-7	-17	0	1	75	4
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	0.8	36.1	37.7	34.8	341	272	-229	-16	-1	-7	-18	0	1	89	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	0.8	35.5	37.4	34.6	376	291	-252	-17	-1	-5	-15	0	1	92	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	0.8	36.1	37.7	34.8	326	261	-219	-16	-2	-7	-17	0	1	85	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	0.8	35.5	37.4	34.6	355	277	-239	-17	-2	-5	-15	0	1	87	4
34.0	34.2	1.0	37.0	2	20	1.65	60	1	1.0	36.3	37.9	34.8	367	272	-233	-16	0	-6	-16	0	1	100	1
34.0	34.2	1.0	37.0	1	20	1.80	75	1	1.0	35.8	37.5	34.6	438	291	-253	-17	0	-5	-15	0	1	100	2
34.0	34.2	1.0	37.0	2	60	1.65	60	1	1.0	36.1	37.7	34.7	333	261	-224	-16	0	-6	-15	0	1	98	3
34.0	34.2	1.0	37.0	1	60	1.80	75	1	1.0	35.5	37.4	34.5	362	277	-243	-17	0	-4	-13	0	1	100	4

Lebenslauf

Ich , Peter Höppe, wurde am 3.10.1954 in Hassfurt als Sohn des Versicherungskaufmannes Helmut Höppe und seiner Ehefrau Ilse Höppe, geb. Trappe, geboren und evangelisch getauft.

Nach zwei Jahren in Hassfurt zogen meine Eltern, mein fünf Jahre älterer Bruder Wolfgang und ich nach Bad Godesberg, wo wir ein Jahr lang lebten. Mein nächster Wohnort war München. Dort wurde ich im Jahre 1960 in die Grundschule an der Feldbergstraße eingeschult. 1965 trat ich in das mathematisch-naturwissenschaftliche Asam - Gymnasium über, an dem ich nach neun Schuljahren mit Erfolg die Reifeprüfung ablegte. Im Wintersemester 1974 wurde ich als Student an der Ludwig Maximilians Universität in München immatrikuliert.

Die wichtigsten Stationen des Studiums waren 1976 die Diplom Vorprüfung und 1979 die mit der Gesamtnote "sehr gut" abgelegte Diplomprüfung.

Im Februar 1980 begann ich meine berufliche Laufbahn als wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Bioklimatologie und angewandte Meteorologie, an dem ich auch heute noch arbeite. Während dieser Zeit entstanden die vorliegende Dissertation mit dem Thema "Die Energiebilanz des Menschen" und die folgenden Veröffentlichungen.

1979 Energetisches Modell der Respiration. In: Münchener Universitätschriften, Fak. Physik - Meteorolog. Inst. Wiss. Mitt.35, 155-161.

1981 Temperatures of Expired Air under Varying Climatic Conditions. In: Int. J. Biometeor., 25, 2, 127-132.

1982 Tägliche Blutdruckvariabilität und Witterungsfaktoren. In: Münchener Universitätsschriften, Fak. Physik - Meteorolog. Inst. Wiss. Mitt. 45, 72-81.

1982 Der Wasserverlust des Menschen unter verschiedenartigen Klimabedingungen. In: Münchener Universitätsschriften, Fak. Physik-Meteorolog. Inst. Wiss. Mitt. 45, 34-48.

1982 Physikalische Prinzipien in der Biometeorologie. In: Promet 3/4, 4-9.

1983 Zusammen mit Dr. Mayer: Bioklimatische Aspekte des Waldklimas. In: Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim., 12, 5-11.

Wissenschaftliche Mitteilungen des Meteorologischen Instituts der Universität München

- Nr. 1⁺ BAUMGARTNER, A.: Meteorologische Untersuchungen bei Frostschutzmaßnahmen im Pflanzgarten Grafrath, 1953.
- Nr. 2⁺ POHL, W.: Untersuchungen an einem Strahlungsbilanzmesser, 1954.
- Nr. 3⁺ Erfahrungen und Überlegungen zur Meßmethodik bei meteorologischen Untersuchungen im Gelände, 1956.
GEIGER, R.: Der Forschungswagen für mikrometeorologische Untersuchungen.
FIMPEL, H.: Das elektrische Psychrometer für den Forschungswagen.
HOFMANN, G.: Die Temperaturmessung als Basis meteorologischer Meßverfahren.
KRAUS, H.: Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten mit Thermistoren.
FIMPEL, H.: Über den Einfluß der dauernden Wasserzufuhr beim Psychrometer.
HOFMANN, G.: Die beidseitig freie Tauplatte.
- Nr. 4⁺ BAUMGARTNER, A.: Beobachtungswerte und weitere Studien zum Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes, 1957.
- Nr. 5 HOFMANN, G.: Meteorologisches Instrumentenpraktikum, 1960.
- Nr. 6 KORB, G.: Absorption von Sonnenstrahlung in Wolken, 1961.
- Nr. 7 HOFMANN, G. und KRAUS, H.: Der Aufbau der meteorologischen Station beim Forschungsreaktor München, 1962.
HOFMANN, G. und KRAUS, H.: Ein Gerät zur digitalen Registrierung von Temperatur und Windgeschwindigkeit.
- Nr. 8⁺ HOFMANN, G., KRAUS, H. und MANIER, G.: Ergebnisse der Messungen von Temperatur- und Windschichtung an der meteorologischen Station beim Forschungsreaktor München vom 1. Juli 1961 bis zum 28. Februar 1962, 1962.
- Nr. 9 Prof. Dr. Rudolf Geiger zum 70. Geburtstag, 1964:
KLEINLEIN, G.: Klimaverwerfung und Forstwirtschaft.
LORENZ, D.: Der Einfluß des Absorptionsvermögens von Bodenoberflächen im Langwelligen auf die Messung der Bodenoberflächentemperatur mit Radiometern.
REITER, R.: Erste Ergebnisse gleichzeitiger Registrierungen der Globalstrahlung im kurzwelligen Ultraviolett in verschiedenen Höhen mit Hilfe UV-empfindlicher Zählrohre.
POHL, W.: Meteorologie und die Nutzung der Kernenergie.
GEBHART, R.: Untersuchungen an Strahlungsschutzhütten.
VAUPEL, A.: Logik und Bio-Logik.
ROTH, R.: Die höhenabhängige Änderung der Windrichtung in der bodennahen Luftschicht.
HOFMANN, G.: Ein Schalenkreuzanemometer ohne Anlaufgeschwindigkeit.
FIMPEL, H.: Messung der Temperatur einer Grasoberfläche mit einem Gesamtstrahlungs-pyrometer.
KRAUS, H.: Die Entstehung von Straßenglätte durch gefrorenen Tau, Reif und Beschlag.
- Nr. 10⁺ ROTH, R.: Ein Gerät zur Untersuchung der kurzfristigen Schwankungen meteorologischer Parameter, 1965.
KARSTENSEN, H.: Ein Analog-Digital-Umsetzer mit Tonbandspeicher zur Untersuchung von Schwankungen meteorologischer Parameter.
- Nr. 11 Tabellen der Stundenmittel von Lufttemperatur, Feuchttemperatur und Windgeschwindigkeit in 2, 5, 10, 20 und 50 m Höhe für die Jahre 1962 und 1963, 1967.
- Nr. 12⁺ TAJCHMAN, St.: Energie- und Wasserhaushalt verschiedener Pflanzenbestände bei München, 1967.
- Nr. 13 ULLRICH, R.B.: Das Temperatur- und Windprofil an der meteorologischen Station beim Forschungsreaktor München, 1967.
- Nr. 14 SCHÖLLMANN, E.: Statistische Bearbeitung der an der meteorologischen Station beim Forschungsreaktor München gewonnenen Meßdaten, 1968.

- Nr. 15 SCHÖNWIESE, Ch.-D.: Spektrale Varianzanalyse klimatologischer Reihen im lang-periodischen Bereich.
- Nr. 16 BERZ, G.: Untersuchungen zum Wärmehaushalt der Erdoberfläche und zum bodennahen atmosphärischen Transport.
- Nr. 17 KLEMMER, L.: Die Periodik des Radialzuwachses in einem Fichtenwald und deren meteorologische Steuerung.
- Nr. 18 FIEDLER, F.: Klimawerte zur Temperatur- und Windschichtung in den untersten 50 m der Atmosphäre.
- Nr. 19 PAESLER, M.: Die Temperaturmessungen in München 1781 - 1968.
- Nr. 20 WALK, O. G.: Zur Interpretation von Energie-, Ko- und Quadratspektren meteorologischer Parameter.
- Nr. 21 Prof. Dr. F. Möller zum 65. Geburtstag:
Vorträge der Klausur-Tagung der Meteorologischen Institute der Universität München in Leoni vom 24. - 26.2.1971.
- Nr. 22^x STRAUSS, R.: Energiebilanz und Verdunstung eines Fichtenwaldes im Jahre 1969.
- Nr. 23 BAUMGARTNER, A., PAESLER, M. und STRAUSS, R.: Temperaturmessungen in München 1781 - 1968 Monatsmittel, Extremwerte und Anzahl besonderer Tage.
- Nr. 24 SCHÖNWIESE, Ch.-D.: Schwankungsklimatologie im Frequenz- und Zeitbereich.
- Nr. 25 BAUMGARTNER, A. und GIETL, G.: Globalstrahlung in München 1960 - 1974. Aus den Arbeiten des Instituts für Meteorologie der Forstlichen Forschungsanstalt München, Februar 1975.
- Nr. 26 HAGER, H.: Kohlendioxid-Konzentrationen, -Flüsse und -Bilanzen in einem Fichtenhochwald, München 1975.
- Nr. 27 FREYTAG, C.: Statistische Eigenschaften der Energiedissipation. München, Mai 1976.
- Nr. 28 ABEL, H., BAUMGARTNER, A. und DONLE, W.: Energie und Wasserumsätze bei der Atmung. März 1977.
- Nr. 29 KRIEBEL, K. T.: Reflection Properties of Vegetated Surfaces: Tables of Measured Spectral Biconical Reflectance Factors. September 1977.
- Nr. 30 KÖPKE, P.: Bestimmung der atmosphärischen Trübung mittels geostationärem Satelliten. München, November 1977.
- Nr. 31 KIRCHNER, M.: Anthropogene Einflüsse auf die Oberflächenalbedo und die Parameter des Austausches in der Grenze Erde/Atmosphäre. November 1977.
- Nr. 32 HENNEMUTH, B.: Statistische Beschreibung der Anisotropie und Inhomogenität der atmosphärischen Turbulenz. März 1978.
- Nr. 33^x QUENZEL, H. und KÄSTNER, M.: Remote Sensing of Chlorophyll in the Ocean: Masking Effects by the Atmosphere. September 1978.
- Nr. 34 QUENZEL, H. und MÜLLER, H.: Optical Properties of Single Mie Particles: Diagrams of Intensity- Extinction- Scattering- and Absorption Efficiencies. Oktober 1978.
- Nr. 35 MAYER, H., GIETL, G. und ENDERS, G. (Hrsg.): Festschrift "Prof. Dr. A. Baumgartner zum 60. Geburtstag". Oktober 1979.
- Nr. 36 FREYTAG, C. und HENNEMUTH, B. (Hrsg.): Hangwindexperiment Innsbruck Oktober 1978 - Datensammlung - . München, Juli 1979.
- Nr. 37 ABEL, H., BAUMGARTNER, A. und DONLE, W.: Klassifikationsversuche von Erkrankungszahlen. August 1979.
- Nr. 38 SCHEIDLE, R.: Ein zweiter Produktionsmechanismus für OH, nachgewiesen durch Ballonmessungen des OH-Himmelsleuchtens in verschiedenen Banden im nahen Infrarot. München, Februar 1980.
- Nr. 39 ESCHER-VETTER, H.: Der Strahlungshaushalt des Vernagtferners als Basis der Energiehaushaltsberechnung zur Bestimmung der Schmelzwasserproduktion eines Alpengletschers. August 1980.

- Nr.40 ABEL, H., BAUMGARTNER, A. und DONLE, W.: Jahreszeit und Witterung im Krankheitsgeschehen. August 1980
- Nr.41 BANGERT, W.: Bestimmung von Spurengasverteilungen in der oberen Atmosphäre aus der Messung der Emission von O_2 ($1\Delta_g$) bei $1.27\ \mu m$. November 1980.
- Nr.42 BEIER, N., OBERMEIER, A. und SOMIESKI, F.: Ein Modell zur numerischen Simulation der Temperatur eines Wohnhauses im meteorologischen Umfeld zur Untersuchung von Heizenergieeinsparungsmöglichkeiten. Januar 1981.
- Nr.43 FREYTAG, C. und HENNEMUTH, B. (Herausg.): DISKUS - Gebirgswindexperiment im Dischmatal - Datensammlung Teil 1: Sondierungen. März 1981.
- Nr.44 MÜLLER, H.: Die Bestimmbarkeit der atmosphärischen Aerosolgrößenverteilung mit Hilfe eines 4-Wellenlängen-Lidars. Juli 1981.
- Nr.45 BAUMGARTNER, A.: Dr. Wilhelm Donle zum 80. Geburtstag Festschrift. April 1982.
- Nr.46 FREYTAG, C. HENNEMUTH, B. DISKUS - Gebirgswindexperiment im Dischmatal - Datensammlung Teil 2: Bodennahe Messungen und Flugzeugmessungen. August 1982.
- Nr.47 OELHAF, H. and FISCHER H.: Measurements of Minor Constituents in the Middle Atmosphere from IR Limb Emission Spectra - A Feasibility Study. Februar 1983
- Nr.48 FREYTAG, C., HENNEMUTH, B. (Herausg.): MERKUR - Mesoskaliges Experiment im Raum Kufstein - Rosenheim. August 1983

